

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Kristijan Čabraja**

Zagreb, 2018. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Mirko Jakopčić, dipl. ing.

Student:

Kristijan Čabraja

Zagreb, 2018. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se izv. prof. dr. sc. Mirku Jakopčiću na razumijevanju i vođenju kroz diplomski rad, posebno kroz pripremu. Zahvaljujem se izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću, a posebno se zahvaljujem asistentici dr. sc. Maji Jurici na savjetima i kritikama koje se oblikovale ovaj rad i na pomoći kod pripreme eksperimentalnog dijela. Zahvaljujem svim djelatnicima Katedre za zavarivanje, Katedre za nerazorna ispitivanja, Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava i g. Ivanu Vovku za pomoć i asistiranje pri izradi eksperimentalnog dijela.

Zahvaljujem se djelatnicima firme Đuro Đaković-Specijalna vozila, a posebno Mariu Jagnjiću dipl.ing.IWE, što su mi omogućili izradu uzorka zavara izvedenih s robotom u njihovoj proizvodnoj hali.

Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima Mili i Nenadu te supruzi Lei na bezuvjetnoj podršci i razumijevanju tijekom pisanja ovog rada i cijeloga studija.

Kristijan Čabraja



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **KRISTIJAN ČABRAJA** Mat. br.: **0035188681**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Optimizacija robotiziranog postupka zavarivanja oklopnog čelika**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Optimization of robotized process of armored steel welding**

Opis zadatka:

Zavarivanje oklopnog (panciranog) čelika je tehnološki zahtjevno, kako zbog specifičnosti materijala, tako i zbog zahtjeva za visokom kvalitetom zavora na namjenskim konstrukcijama koje se proizvode iz ove vrste čelika. Pri tome se postavljaju i visoki zahtjevi za tolerancijama oblika i položaja proizvoda, kao što su, na primjer, ravnost i paralelnost ploha nakon zavarivanja. Stoga je neupitna potreba analize kvalitete zavora i unaprjeđenja procesa zavarivanja.

Namjera je proizvođača da dosadašnje ručno-elektrolučno zavarivanje namjenskih proizvoda od oklopnog čelika zamijeni zavarivanjem pomoću robota. Budući da se takvo zavarivanje u pojedinim tehnološkim značajkama razlikuje u odnosu na ručno zavarivanje, potrebno je provesti ispitivanja strukturnih i mehaničkih svojstava zavarenoga spoja izvedenog robotiziranim postupkom, uz kombinaciju odabranih parametara zavarivanja. Cilj je utvrditi najpovoljniju kombinaciju parametara zavarivanja, kojom bi se ostvarila najveća produktivnost, uz postizanje tražene kvalitete zavora.

U radu je potrebno:

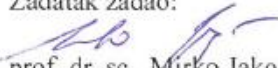
1. opisati funkcionalne značajke robota za zavarivanje i prikazati glavne tehnološke parametre zavarivanja robotom
2. definirati kriterije za izradu ispitnih uzoraka koji će biti referentni za stvarni proizvod
3. izraditi ispitne uzorke prema definiranim kriterijima
4. provesti metalografsku analizu i mehaničko ispitivanje uzoraka, sukladno normi
5. analizom rezultata ispitivanja utvrditi najpovoljniju kombinaciju parametara zavarivanja kojom se može postići najveća produktivnost i potrebna kvaliteta zavora
6. donijeti zaključak.

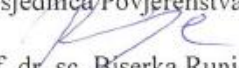
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
03. svibnja 2018.

Rok predaje rada:  
05. srpnja 2018.

Predviđeni datum obrane:  
11. srpnja 2018.  
12. srpnja 2018.  
13. srpnja 2018.

Zadatak zadao:  
  
prof. dr. sc. Mirko Jakopčić

Predsjednica Povjerenstva:  
  
prof. dr. sc. Biserka Runje

# SADRŽAJ

<b>SADRŽAJ</b> .....	I
<b>POPIS SLIKA</b> .....	IV
<b>POPIS TABLICA</b> .....	VI
<b>POPIS OZNAKA</b> .....	VII
<b>SAŽETAK</b> .....	VIII
<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. OKLOPNI ČELICI VISOKE ČVRSTOĆE</b> .....	2
2.1. Proizvodnja OČTV .....	2
2.2. Svojstva OČTV .....	6
2.2.1. <i>Kemijski sastav</i> .....	6
2.2.1.1. <i>Utjecaj legirnih elemenata</i> .....	7
2.2.2. <i>Mikrostruktura</i> .....	8
2.2.2.1. <i>Mehanizmi očvrstnuća ultra čvrstih čelika</i> .....	9
2.2.3. <i>Svojstva</i> .....	10
2.2.4. <i>Toplinska obrada</i> .....	13
2.2.5. <i>Rezljivost</i> .....	13
2.2.6. <i>Obrada deformiranjem (savijanje)</i> .....	14
2.2.7. <i>Obrada odvajanja čestica</i> .....	15
<b>3. ZAVARLJIVOST</b> .....	17
3.1. <i>Mikrostruktura</i> .....	17
3.2. <i>Unos topline</i> .....	18
3.2.1. <i>Predgrijavanje</i> .....	19
3.2.1.1. <i>Određivanje temperature predgrijavanja</i> .....	20
3.2.1.2. <i>Temperatura predgrijavanja ARMOX 440T čelika</i> .....	20
3.3. <i>Greške u zavarenom spoju</i> .....	21
3.3.1. <i>Hladne pukotine</i> .....	21

3.3.1.1. Utjecaj strukture na pojavu hladnih pukotina.....	23
3.3.1.2. Utjecaj zaostalih naprezanja na stvaranje hladnih pukotina.....	24
3.3.1.3. Utjecaj difuzijskog vodika na stvaranje hladnih pukotina .....	24
3.4. Tehnologija zavarivanja .....	25
<b>4. MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA .....</b>	<b>27</b>
4.1. O postupku.....	27
4.2. Parametri zavarivanja .....	28
4.2.1. Napon zavarivanja .....	29
4.2.2. Struja zavarivanja .....	29
4.2.3. Promjer dodatnog materijala .....	29
4.2.4. Induktivitet .....	30
4.2.5. Slobodni kraj žice.....	30
4.2.6. Zaštitni plinovi .....	30
4.2.7. Položaj i njihanje pištolja za zavarivanje .....	31
4.3. Prednosti i nedostaci MAG postupka zavarivanja.....	31
4.4. MAG postupak zavarivanja OČVT .....	32
4.4.1. Impulsno MAG zavarivanje .....	32
4.4.1.1. Određivanje osnovnih parametara impulsnog MAG zavarivanja .....	33
4.4.2. Izbor vrste i količine zaštitnog plina .....	34
4.4.3. Izbor dodatnog materijala .....	35
4.5. CMT postupak zavarivanja.....	37
<b>5. ROBOTSKA STANICA ZA ZAVARIVANJE.....</b>	<b>38</b>
5.1. MOTOMAN ArcSistem VMF 500 S5D .....	39
5.2. Uređaj za zavarivanje .....	42
<b>6. EKSPERIMENTALNI DIO .....</b>	<b>44</b>
6.1. Predobrada uzoraka .....	44
6.2. Zavarivanje uzoraka .....	46

6.2.1. <i>Dodatni materijal</i> .....	46
6.2.2. <i>Tijek zavarivanja</i> .....	46
6.3. <i>Nerazorna ispitivanja</i> .....	59
6.3.1. <i>Vizualna metoda</i> .....	59
6.3.2. <i>Ispitivanje magnetnim česticama</i> .....	60
6.3.3. <i>Radiografsko ispitivanje</i> .....	63
6.4. <i>Razorna ispitivanja</i> .....	66
6.4.1. <i>Priprema uzoraka</i> .....	66
6.4.2. <i>Makroizbrusci</i> .....	69
6.4.3. <i>Ispitivanje savijanjem</i> .....	74
6.4.4. <i>Statičko vlačno ispitivanje</i> .....	78
<b>7. ZAKLJUČAK</b> .....	84
<b>LITERATURA</b> .....	86

## POPIS SLIKA

Slika 1. Tijek proizvodnje oklopnih čelika visoke tvrdoće [2] .....	2
Slika 2. Isporuca sirovina, pretvorba ugljena i metalurški proces [2].....	3
Slika 3. Kisikov konverter [2] .....	4
Slika 4. LD proces, Ljevački lonac i kontinuirano lijevanje [2] .....	4
Slika 5. Toplo valjanje [2].....	5
Slika 6. Rezanje, popuštanje, gašenje, pjeskarenje i površinska zaštita premazom [2] .....	5
Slika 7. Dijagram naprezanja – istezanja čelika [8] .....	12
Slika 8. Istosmjerno glodalo – pravilno (lijevo) i pogrešno (desno) korištenje [2] .....	16
Slika 9. Mjesta nastanka i orijentacija hladnih pukotina prema IIW [15].....	22
Slika 10. Utjecajni čimbenici nastanka hladnih pukotina [15].....	23
Slika 11. Shematski prikaz MAG postupka zavarivanja [3] .....	28
Slika 12. Grafički prikaz impulsnog postupka i načina otkidanja kapljice [15] .....	33
Slika 13. Certifikat dodatnog materijala – INERTFIL 307 [24] .....	36
Slika 14. Certifikat dodatnog materijala – MG 2 [24] .....	37
Slika 15. CMT postupak zavarivanja [25].....	38
Slika 16. Zavarivačka stanica.....	41
Slika 17. Robotska ruka, pozicioner i izvor struje za zavarivanje .....	42
Slika 18. Izvor struje za zavarivanje Synergic 4000 CMT R.....	43
Slika 19. Laserski uređaj TruLaser 3060 .....	44
Slika 20. Portalna glodalica Forest-Line .....	45
Slika 21. Postupak čišćenja ploča .....	45
Slika 22. Programiranje robota za zavarivanje.....	47
Slika 23. Zavarivanje kutnog uzorka.....	47
Slika 24. Mjerenje jakosti magnetskog polja .....	61
Slika 25. Tijek ispitivanja.....	61
Slika 26. Parametri rendgenskog snimanja .....	63
Slika 27. Rendgen uređaj BALTEAU GM 300D .....	64
Slika 28. Uzorak sa svim indikatorima .....	64
Slika 29. Shematski prikaz izrade ispitnih uzoraka na zavarenom sučeljenom spoju sukladno normi HRN EN ISO 15614-1:2007.....	67
Slika 30. Shematski prikaz izrade ispitnih uzoraka na zavarenom kutnom spoju sukladno normi HRN EN ISO 15614-1:2007.....	67



Slika 31. Epruveta za ispitivanje savijanjem.....	68
Slika 32. Skica epruvete za statičko vlačno ispitivanje.....	69
Slika 33. Uzorak 1 – sučeoni spoj .....	69
Slika 34. Uzorak 2 – sučeoni spoj .....	70
Slika 35. Uzorak 1 – kutni spoj .....	70
Slika 36. Uzorak 2 – kutni spoj .....	71
Slika 37. Uzorak 3 – kutni spoj .....	71
Slika 38. Uzorak 4 – kutni spoj .....	72
Slika 39. Uzorak 5 – kutni spoj .....	73
Slika 40. Uzorak 7 – kutni spoj .....	73
Slika 41. Uzorak 6 – kutni spoj .....	74
Slika 42. Naprava za ispitivanje savijanjem.....	75
Slika 43. Kidalica EU 40 MOD .....	79
Slika 44. Epruveta 8-1 – tlocrt pogled.....	80
Slika 45. Dijagram sila-produljenje – epruveta 8-1 .....	80
Slika 46. Epruveta 8-2 – tlocrt pogled.....	81
Slika 47. Epruveta 8-2 – bočni pogled .....	81
Slika 48. Dijagram sila-produljenje – uzorak 8-2 .....	81
Slika 49. Epruveta 9-3 – tlocrt pogled.....	82
Slika 50. Epruveta 9-3 – bočni pogled .....	82
Slika 51. Dijagram sila-produljenje – uzorak 9-3 .....	82
Slika 52. Epruveta 9-4 – tlocrt pogled.....	83
Slika 53. Dijagram sila-produljenje – uzorak 9-4 .....	83

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Granica između primjese i legirajućeg elementa za pojedine kemijske elemente [5]	6
Tablica 2. Kemijski sastav čelika ARMOX® 440T [2]	7
Tablica 3. Mehanička svojstva ARMOX® 440T [2]	10
Tablica 4. Postupci rezanja čelika ARMOX® 440T [2]	13
Tablica 5. Iznos koeficijenta iskoristivosti električnog luka za pojedini postupak [3]	19
Tablica 6. Podjela grešaka u zavarenim spojevima [14]	21
Tablica 7. Ovisnost protoka zaštitnog plina o debljini žice [2]	31
Tablica 8. Rezultati zavarivanja – kutni spoj	48
Tablica 9. Rezultati zavarivanja – sučeoni spoj	49
Tablica 10. Rezultati ispitivanja magnetskim česticama	62
Tablica 11. Rezultati radiografskog ispitivanja sučeljenog zavarenog spoja	65
Tablica 12. Rezultati ispitivanja savijanjem – uzorak 8	76
Tablica 13. Brojčane vrijednosti kutova – Uzorak 8	76
Tablica 14. Rezultati ispitivanja savijanjem – uzorak 9	77
Tablica 15. Brojčane vrijednosti kutova – Uzorak 9	78

## **POPIS OZNAKA**

OČVT	Oklopni čelici visoke tvrdoće
LD pretvarač	Linz-Donawitz pretvarač
ZUT	Zona utjecaja topline
ISO	International Organization for Standardization
BCT	Body Centered Tetragonal
TIG	Tungsten Inert Gas
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
EPP	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom praška
FCC	Face Centered Cubic
BCC	Body Centered Cubic
FCAW	Flux Cored Arc Welding
CMT	Cold Metal Transfer
WPS	Welding Procedure Specification

## **SAŽETAK**

Ovaj radu u svom teoretskom dijelu detaljno opisuje način proizvodnje oklopnih čelika visoke tvrdoće te značajke i postupke zavarivanja koji su korišteni u eksperimentalnom dijelu. Opisana je i robotska stanica na kojoj je provedeno zavarivanje uzoraka.

U ekperimentalnom dijelu rada provedeno je MAG zavarivanje uzoraka izrađenih od čelika ARMOX 440T, te ispitivanje izvedenih zavora nerazornim i razornim metodama. Od nerazornih metoda provedena je vizualna provjera uzoraka, ispitivanje magnetnim česticama i rendgensko snimanje, a od razornih metoda provedeno je ispitivanje makrouzoraka, ispitivanje savijanjem, te statičko vlačno ispitivanje. Nakon ispitivanja provedena je analiza dobivenih rezultata te je na temelju rezultata donesen zaključak.

Ključne riječi:

Čelik ARMOX 440T, MAG zavarivanje, robotsko zavarivanje

## **SUMMARY**

In the theoretical part of the thesis manufacturing and properties of high hardness armor steels, and welding procedures used in experimental part are described in detail. The robotic cell used for welding of samples was also described.

In the experimental part MAG welding of ARMOX 44T steel samples was performed and also non-destructive and destructive testing of welded samples was conducted. Non-destructive testing conducted includes visual inspection of samples, magnetic particle testing and x-ray. Macroscopic examination, bending test, and static tensile testing were performed as part of destructive testing. After the examination, the analysis of the obtained results was carried out and based on the results the conclusion was made.

### **Keywords:**

ARMOX 440T steel, MAG welding, robotic welding

## 1. UVOD

U početku razvoja oklopnih vozila, razina oklopne zaštite bila je jedva dovoljna da minimalno zaštititi posadu. Međutim, vojske su bile sve mobilnije i fleksibilnije, ali pobjeda je uvijek ovisila o tri bitna faktora: mobilnosti, vatrenoj moći i zaštiti. Mobilnost i zaštita oduvijek su postavljale određene uvjete za oklop. Za što veću mobilnost bio je potreban što lakši oklop, dok je za veću zaštitu potreban bio što deblji oklop, veće mase, čime se smanjivala mobilnost vozila. Taj problem bio je u to vrijeme glavni izazov istraživačima i znanstvenicima na tom području, što je potaknulo na inovativnost i dosjetljivost u samom konstruiranju i razvijanju oklopnih materijala za zaštitu. Stoga su metali postali posebno zanimljivi i važni za primjenu u proizvodnji oklopa.

Razvoj oklopa je uvijek uzastopce pratio razvoj protuoklopnih oružja, a u novije vrijeme došlo je do preokreta u istraživanjima, pa se sada prvo razvijaju oklopi, a zatim odgovarajuća oružja koja će ih probiti. Posljednjih stotinjak godina oklop je postao nezamjenjiv dio naoružanja i velika sredstva se ulažu u razvoj lakšeg, mehanički izdržljivijeg i cjenovno dostupnijeg oklopa. [1]

Čelik je do danas najčešće korišten materijal na oklopnim vozilima, uglavnom zato što je to „svestran“ materijal. Žilavost, tvrdoća, dobra svojstva zamora, jednostavnost izrade i njegova relativno niska cijena, čine čelik najprihvatljivijim izborom za oklop trupa vozila.

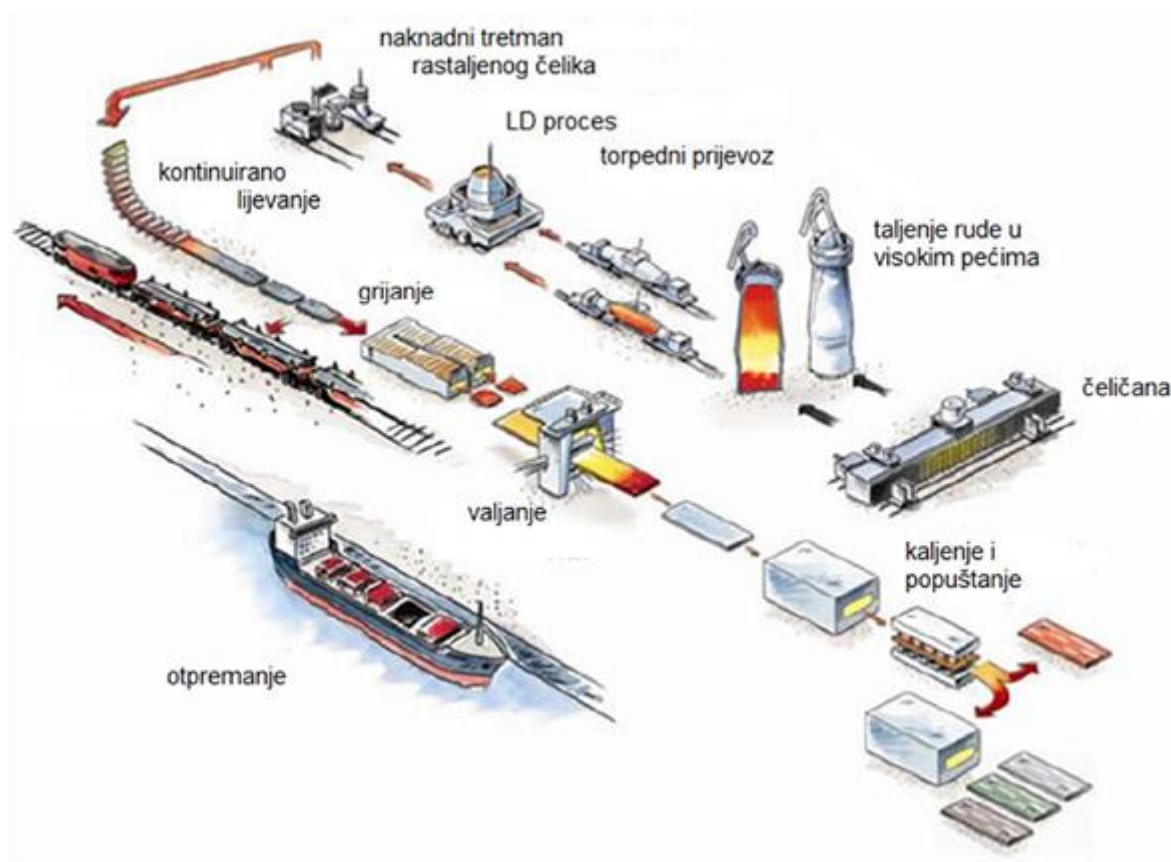
Najčešće primjenjivana tehnologija spajanja čelika je zavarivanje, pri čemu treba paziti da se postupkom zavarivanja ne umanje mehanička ili ostala svojstva materijala. Kad se govori o tehnologiji zavarivanja oklopnih čelika, potrebno je paziti na cijeli niz utjecajnih faktora, koji su vrlo često u kompleksnoj međusobnoj korelaciji zbog načina proizvodnje i utjecaja legiranih elemenata. Kako se danas traži što veća produktivnost, time je i robot za zavarivanje sve više prisutniji u proizvodnji. Kod zavarivanja oklopnog čelika, kao i kod svakog drugog zavarivanja, moguća je pojava grešaka u zavarenom spoju, koje rezultiraju nekvalitetnim spojem. Neke od tih grešaka su obrađene u ovom radu, a uz njih će se pozornost posvećuje pripadajućim postupcima zavarivanja te se kroz dobivene rezultate uspoređuje ručno i robotsko zavarivanje oklopnih čelika.

## 2. OKLOPNI ČELICI VISOKE ČVRSTOĆE

Istraživanja diljem svijeta na području oklopnih materijala usmjerena su na razvoj tehnologija oklopa smanjene mase koji su otporni na probojnost kinetičkim protuoklopnim projektilima. Dok mnoge primjene uključuju korištenje metala niže gustoće od čelika, kao što su aluminij i titan, određena grupa čelika je i dalje primjenjiva zbog svojih dobrih balističkih svojstava i nezamjenjivih karakteristika kod konstruiranja. Mogućnost obrade komponenti oklopa u komercijalnim i vojnim područjima primjene s dostupnom opremom i osposobljenim kadrom glavna je prednost pri odabiru ovih čelika. Kako bi se što preciznije zadovoljili ovi zahtjevi počinju se osmišljati i proizvoditi oklopni ultra čvrsti čelici, u koje spadaju i oklopni čelici velike tvrdoće (OČVT) (eng. AHHS – Armor High Hardness Steel). [2,3]

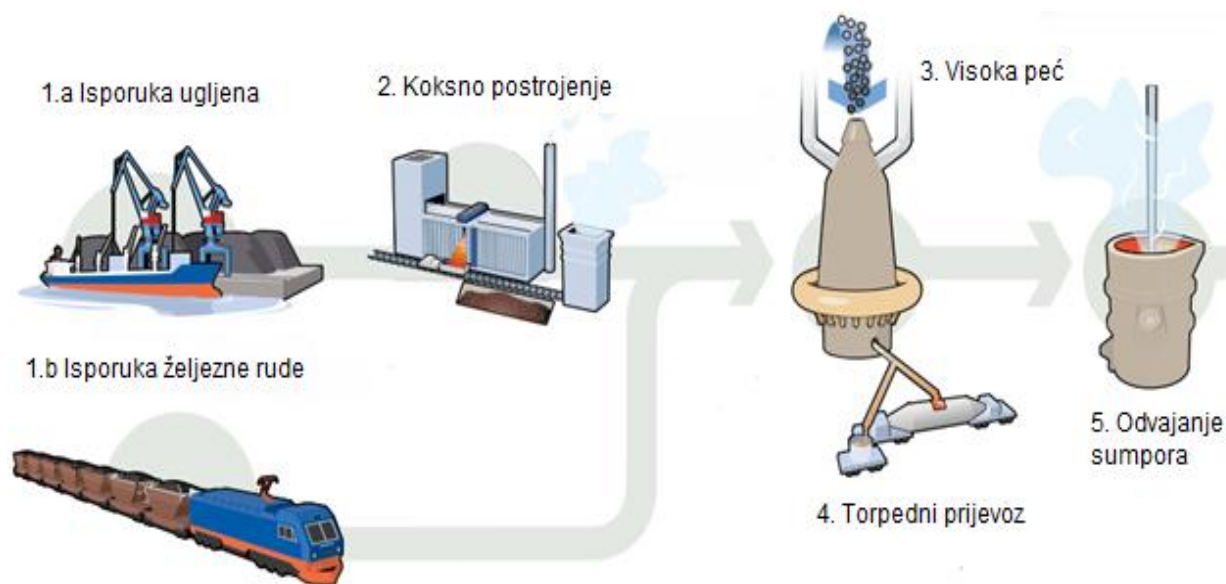
### 2.1. Proizvodnja OČTV

Proizvodnja OČTV-a je vrlo složeni proces čiji je tijek procesa proizvodnje prikazan na slici 1.



Slika 1. Tijek proizvodnje oklopnih čelika visoke tvrdoće [2]

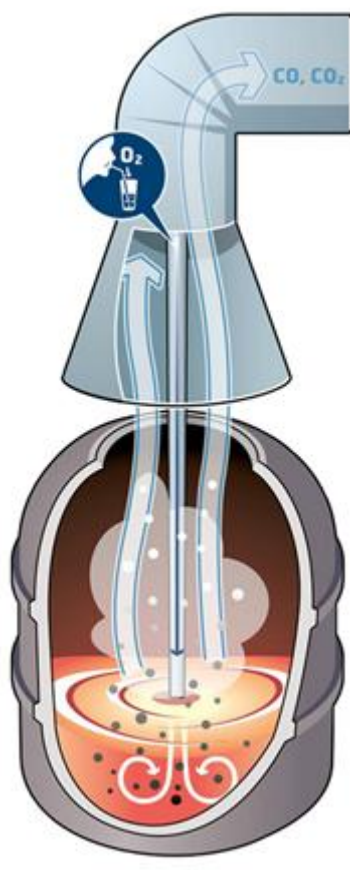
Slika 2. prikazuje detaljniji metalurški proces dobivanja oklopnih čelika visoke tvrdoće uz objašnjenje.



Slika 2. Isporučka sirovina, pretvorba ugljena i metalurški proces [2]

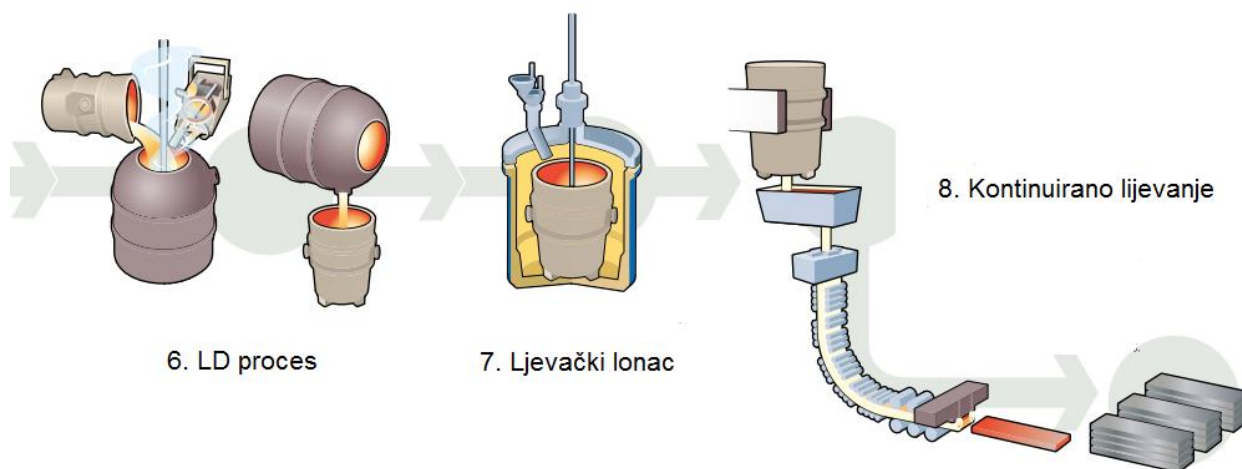
Za proizvodnju oklopnih čelika visoke tvrdoće potrebna je željezna ruda i ugljen koji se isporučuju do tvornice morskim i željezničkim prijevozom, što je danas najjeftiniji ali i ne najbrži mogući prijevoz. Ugljen se u koksnom postrojenju pretvara u koks i plin koji dalje idu prema visokoj peći. Koks se ubacuje u visoku peć, a plin se pretvara u energiju. Kuglice željezne rude, koks i vapnenac konstantno se ubacuju u visoku peć. Proces koji se događa u visokoj peći je taljenje i redukcija kisika iz željezne rude,  $Fe_3O_4$ . Kako bi se željezo oslobodilo od kisika, potrebno je dodati tvar koja će se vezati s kisikom na velikoj temperaturi, stoga se dodaje koks, ugljen u prahu kao i neki aditivi za pospješivanje procesa. Ovaj se proces zove koksiranje. Temperatura u najtoplijoj zoni je  $2200^{\circ}C$ . Kada se sirovo željezo reducira i rastali te postigne određena razina u visokoj peći, vrući metal se spušta na dno visoke peći gdje se sakuplja i izlazi izvan peći. Vrući metal se transportira u motornim vlakovima poznatim pod nazivom torpedo. Točka 5 (Slika 2.) prikazuje odvajanje sumpora i ostalih nečistoća iz vrućeg metala. Nakon odvajanja nečistoća rastaljeni metal se vodi u LD pretvarač (LD - Linz-Donawitz postupak). U LD pretvarač se ubacuje vrući metal i sredstva za hlađenje. U LD pretvaraču se nalazi kisikov konverter (Slika 3.).[2]





Slika 3. Kisikov konverter [2]

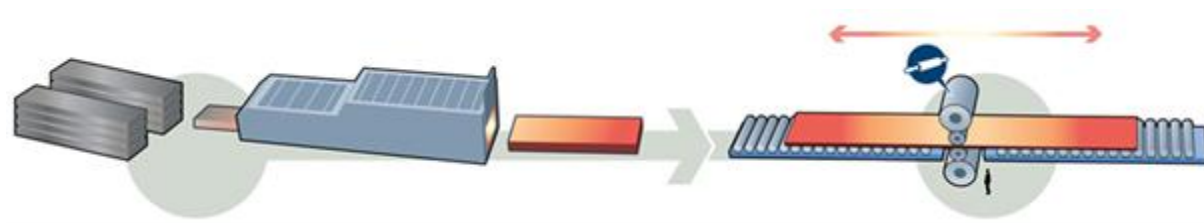
U kisikovom konverteru upuhuje se kisik pod tlakom u talinu čime se temperatura podiže na  $1600^{\circ}\text{C}$  te kisik reagira s ugljikom, silicijem i drugim elementima. Dodaje se i vapnenac koji se veže sa silicijem i drugim elementima kako bi stvorio šljaku. U kisikovom konverteru rafinira se postotak ugljika, snizuje se s 4,5 % na 1,7 do 1,5 % kako bi se dobio čelik koji se može kontinuirano ljevati i valjati [2].



Slika 4. LD proces, Ljevački lonac i kontinuirano lijevanje [2]

Nakon toga rastaljeni čelik se prebacuje u ljevački lonac (Slika 4.). U njemu se talina podvrgava raznim procesima u kojima se u uvjetima strogo kontrolirane temperature dodaju legirni elementi i aditivi s velikom točnošću od čak jedne čestice u milijun čestica. Sve se odvija u vakuumskoj atmosferi kako bi se postigla zadovoljavajuća čistoća čelika, ponajviše zbog vodika koji je neželjeni element u tom čeliku. Pri  $1600^{\circ}\text{C}$  rastaljeni se metal lijeva u međuspremnik iz kojeg se istače u otvoreni kalup hlađen vodom. U njemu se prvo skrućuje vanjski sloj ploče pri temperaturi lijevanja od  $1540^{\circ}\text{C}$  nakon čega se kontinuirano hladi vodom što dovodi do kaljenja. Čelik je i dalje užaren, no potpuno skrutnut pri  $1000^{\circ}\text{C}$ , potom se plinski reže u struji kisika i ostavlja hladiti. [2]

Kako bi se postigla zahtijevana mehanička svojstva, dobivene ploče je potrebno toplo deformirati valjanjem pri temperaturi od  $1250^{\circ}\text{C}$  uz prethodno čišćenje površine. Valjanje se izvodi pomoću valjačkih stanova kapaciteta  $100000\text{ kN}$  ( Slika 5.) [2,3]



Slika 5. Toplo valjanje [2]

Završna toplinska obrada je gašenje limova brzinama od  $1000^{\circ}\text{C/s}$  uz pomoć vode pod velikim tlakom i popuštanje na  $200 - 700^{\circ}\text{C}$  za postizanje velike tvrdoće. Rezanje na potrebne veličine, pjeskarenje i zaštita premazima je standardan postupak koji se provodi prije isporuke (Slika 6.) [2,3]



Slika 6. Rezanje, popuštanje, gašenje, pjeskarenje i površinska zaštita premazom [2]

## 2.2 Svojstva OČTV

Oklopni čelici visoke tvrdoće moraju zadovoljavati sve standarde koji su im postavljeni kako bi uspješno služili svojoj svrsi. Oklopni čelici visoke tvrdoće se biraju prema vojnom standardu MIL-A-12560H(MR) i moraju zadovoljavati sve uvjete koji su postavljeni u tom standardu.

### 2.2.1. Kemijski sastav

Promatrani čelici spadaju u skupinu legiranih čelika. Kako bi čelik imao neka posebna svojstva koja su rezultat dodavanja legiranih elemenata, a ujedno i kako bi se mogao zvati legiranim čelikom, potrebno je u sastavu tog čelika imati neki od sljedećih elemenata: Si, Mn, Cr, Ni, W, Mo, V, Co, Ti, Cu, Al, B, Nb i/ili Ta. Da bi se neki od navedenih elemenata smatrao legirajućim, njegov maseni udio treba biti veći od udjela navedenog u tablici 1. U suprotnom, element nema dovoljnog utjecaja na svojstva čelika te ga se naziva primjesom. [4]

Tablica 1. Granica između primjese i legirajućeg elementa za pojedine kemijske elemente [5]

gornja granica masenog udjela primjese, %		gornja granica masenog udjela primjese, %	
<b>Al</b>	0,1	<b>Nb</b>	0,06
<b>Cu</b>	0,4	<b>Pb</b>	0,4
<b>B</b>	0,0008	<b>Si</b>	0,5
<b>Co</b>	0,1	<b>Ti</b>	0,05
<b>Cr</b>	0,3	<b>V</b>	0,1
<b>Mn</b>	1,8	<b>W</b>	0,1
<b>Mo</b>	0,08	<b>Ni</b>	0,3
<b>Ostali elementi osim C, P, S, N i O</b>		0,5	

Ugljik se, kada se govori o čelicima, ne smatra legiranim elementom. Primjese kao što su Si i Mn su uvijek prisutne budući da moraju zaostati u čeliku od metalurškog procesa

dezoksidacije i desulfatizacije. Prisutni elementi P i S (rjeđe i As, Sn i Sb) su nečistoće. Po dogovoru, ako je zbroj masenih udjela svih legirajućih elemenata u čeliku manji od 5%, čelik se smatra niskolegiranim. [4]

U tablici 2. prikazan je kemijski sastav za čelik velike tvrdoće ARMOX® 440T. ARMOX je komercijalni naziv za oklopne čelike visoke tvrdoće koje proizvodi tvornica SSAB i udovoljava uvjetima zadanim prema normi MIL-A-12560H(MR).

Tablica 2. Kemijski sastav čelika ARMOX® 440T [2]

ARMOX® 440T	
<b>C</b>	0,16
<b>Si</b>	0,21
<b>Mn</b>	0,85
<b>P</b>	0,008
<b>S</b>	0,001
<b>Cr</b>	0,60
<b>Ni</b>	1,88
<b>Mo</b>	0,597
<b>B</b>	0,002
<b>Fe</b>	ostatak

#### 2.2.1.1. Utjecaj legirnih elemenata

Utjecaj legirnih elemenata koji se koriste kod ARMOX 440T čelika naveden je u sljedećem tekstu [6] :

**Silicij, Si** - silicij je dobar dezoksidator pa se zbog toga rabi kod proizvodnje čelika. Povišuje čvrstoću i otpornost na trošenje, a posebno dobro djeluje na povišenje granice elastičnosti i dinamičke izdržljivosti. Silicij otežava difuziju ugljika kod cementiranja i malo povećava prokaljivost čelika.

**Mangan, Mn** - mangan slično kao i silicij djeluje kao dezoksidator, a također na sebe veže i sumpor. Povišuje granicu razvlačenja, a povoljno djeluje i na žilavost. Mangan znatno povećava zakaljivost čelika. Čelici legirani manganom skloni su krhkosti nakon popuštanja jer imaju nagli porast zrna na visokim temperaturama.

**Fosfor, P** - fosfor je u čeliku nepoželjna primjesa i njegov maseni udio treba držati ispod 0,06%. Fosfor uzrokuje pojavu krhkosti u hladnom stanju pa se zato dodaje nekim čelicima kako bi im se poboljšala rezljivost.

**Sumpor, S** - sumpor je također nepoželjna primjesa koja dolazi iz rude i iz produkata izgaranja  $\text{SO}_2$ . Najveći dopušteni maseni udio sumpora je 0,05 %. Sumpor tvori sa željezom nepoželjni sulfid  $\text{FeS}$  koji se nalazi na granicama zrna. Talište sulfida je na  $985\text{ }^\circ\text{C}$  pa obrade koje imaju temperature više od  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  uzrokuju pojavu *crvenog loma*, a i smanjuje se žilavost čelika. Pozitivan učinak sumpor ima samo kod čelika kojima se treba povećati rezljivost zato jer maseni udio veći od 0,3 % daje kratke i krhke strugotine.

**Krom, Cr** - krom u čeliku djeluje kao jaki karbidotvorac i karbidi koje on tvori su tvrdi od cementita. Karbidi kao tvrdi spojevi povisuju otpornost na pritisak i na abrazijsko trošenje. Krom također povisuje prokaljivost pa su potrebne manje brzine hlađenja za stvaranje martenzitne strukture. Krom povećava tvrdoću čelika pa zbog toga utječe na povećanje krhkosti odnosno smanjenje žilavosti što se dijelom sprječava legiranjem s molidbenom. Krom utječe na smanjenje toplinske vodljivosti čelika i toplinske rastezljivosti čelika.

**Nikal, Ni** - nikal je izrazito gamageni element pa se koristi za legiranje austenitnih nehrđajućih čelika. On ne tvori karbide nego se direktno otapa u rešetki željeza. Njegovim prisutstvom povisuje se žilavost pri niskim temperaturama, ali smanjuje se toplinska vodljivost i toplinska rastezljivost čelika.

**Molidben, Mo** - molidben utječe na povišenje granice razvlačenja, vlačne čvrstoće i granice puzanja. Kod nekih čelika se dodaje da bi smanjio opasnost od pojave krhkosti nakon popuštanja. Ima povoljni utjecaj na stvaranje sitnozrnate mikrostrukture te također na povećanje prokaljivosti. Molidben je jak karbidotvorac pa doprinosi poboljšanju reznih karakteristika brzoreznih čelika.

**Bor, B** - dodaje se u čelike samo zbog poboljšavanja prokaljivosti i to u jako malim količinama. Koristi se s drugim legirnim elementima kao „pojačivač“ jer povećava dubinu otvrdnjavanja kod kaljenja. Najbolje rezultate daje u čelicima s niskim udjelom ugljika.

### 2.2.2. Mikrostruktura

ARMOX čelik je oklopni čelik koji posjeduje izvrsna mehanička svojstva kao što su velika tvrdoća, visoka otpornost na penetraciju čestica u materijal, visoka čvrstoća i zadovoljavajuća

žilavost. Vrlo je bitno kod oklopnih čelika visoke tvrdoće osigurati veliku čistoću mikrostrukture tj. potrebno je dobiti mikrostrukturu bez nečistoća i nehomogenosti. Svaka nečistoća ili uključak potencijalno predstavlja konzentrator naprezanja koji uvelike smanjuje mehanička svojstva samog čelika. Mikrostruktura ARMOX oklopnih čelika visoke tvrdoće proizlazi iz kemijskog sastava i procesa proizvodnje. Proces proizvodnje oklopnih čelika visoke tvrdoće je takav da se dobiva martenzitna mikrostruktura.

Ovi materijali su osjetljivi na koncentrirana naprezanja kao što su oštri prijelazi, nemetalni i metalni uključci. Prema tome važna je čistoća čelika, pa treba pri njenoj proizvodnji primjenjivati čiste sirovine, posebne metode taljenja, precizne metode za izbjegavanje uključaka i plinova i štetnih primjesa, a sve to povisuje troškove.

#### 2.2.2.1. *Mehanizmi očvršnuća ultra čvrstih čelika*

Postignuće visokočvrstog stanja povezano je s postignućem metastabilnog strukturnog oblika s visokom razinom mikronepravilnosti, visokom gustoćom defekata kristalne rešetke (dislokacije i vakancije), a prema tome i s visokom sklonošću prema difuzijskim procesima. Ovdje treba iznimnu pozornost obratiti na prodor vodika koji posljedično uzrokuje vodikovu krhkost. Mehanizmi očvršnuća koji djeluju u visokočvrstim čelicima pa tako i u OČVT su sljedeći: očvršnuće putem kristala mješanaca, transformacijsko očvršnuće (kaljenje), očvršnuće precipitacijom, očvršnuće hladnom i toplom deformacijom (kod OČVT je topla deformacija) te očvršnuće usitnjenjem kristalnih zrna.

*Očvršnuće kristalima mješancima* - očvršnuće koje od svih daje najlošije rezultate jer se za očvršnuće koristi povišenje masenog udjela ugljika, a time opadaju neka druga mehanička svojstva poput žilavosti.

*Očvršnuće martenzitnom transformacijom* - kod tog načina očvršnuća dolazi do transformacije austenita u martenzit čime se povisuje tvrdoća i čvrstoća, ali pada istezljivost i žilavost pa je potrebno provesti popuštanje.

*Očvršnuće hladnom deformacijom* - kod tog očvršnuća bitno je znati da ako je viši stupanj deformacije onda i raste granica razvlačenja jer raste gustoća dislokacija. No kod očvršnuća hladnom deformacijom bitno se smanjuje žilavost.

*Očvršnuće usitnjenjem zrna* - velikokutne granice zrna predstavljaju zapreke gibanju dislokacija pa je povoljnije imati što sitnije zrno. Usitnjenjem zrna dolazi do povećanja žilavosti no istodobno se smanjuje površinska čvrstoća.

*Očvrnuće izlučivanjem i disperzijom faza* - izdvajanje faza nelegiranih ili legiranih karbida ili ostalih prikladnih intermetalnih spojeva i prijelaznih faza iz homogene mikrostrukture. Do pojave dolazi prekoračenjem granice topljivosti stranih atoma u rešetki željeza. Uloga im je ta da povisuju prag energije koji je potreban da bi se plastično deformirao metal. [4,6]

### 2.2.3. Svojstva

OČVT posjeduju kombinaciju dobrih balističkih svojstava i izvrsne žilavosti, tablica 3. Uz ova svojstva imaju dobru obradivost odvajanjem čestica i zadovoljavajuću zavarljivost.

U ovom poglavlju ukratko su obrađena područja osnovnih svojstava i obrade OČVT-a, dok će balistička svojstva i svojstva zavarljivosti biti obrađeni u posebnim poglavljima.

Važnija fizikalna svojstva su gustoća, koeficijent toplinskog širenja i koeficijent toplinske provodnosti. Njihove vrijednosti kreću se oko  $\rho = 7,85 \text{ g/cm}^3$ ,  $\alpha_{(20-100)^\circ\text{C}} = 11,6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  i  $k = 52 \text{ W/(m} \times \text{K)}$ . [2]

Oklopni čelici velike tvrdoće posjeduju granicu razvlačenja  $R_{p0,2} > 1000 \text{ N/mm}^2$ . Najvažnija mehanička svojstva dana su u tablici 3.

Tablica 3. Mehanička svojstva ARMOX® 440T [2]

ARMOX® 440T	
<b>Tvrdoća, HBW</b>	420-480
<b>Udarni rad loma, Charpy-V, -40°C, min J</b>	45,0
<b>Granica elastičnosti, <math>R_{p0,2}</math>, min MPa</b>	1100,0
<b>Vlačna čvrstoća, <math>R_m</math>, Mpa</b>	1250-1550
<b>Istezljivost <math>A_5</math>, min %</b>	10,0
<b>Istezljivost <math>A_{50}</math>, min %</b>	12,0

Oklopni čelici visoke tvrdoće moraju proći kroz nekoliko testova kako bi im se ustvrdila mehanička svojstva koja moraju posjedovati. Jedno od mehaničkih svojstava je tvrdoća.

Tvrdoća se ispituje s nekoliko metoda kojima je osnovni princip mjerenje veličine ili dubine otiska kojeg penetrator, opterećen nekom silom, ostavi na materijalu.

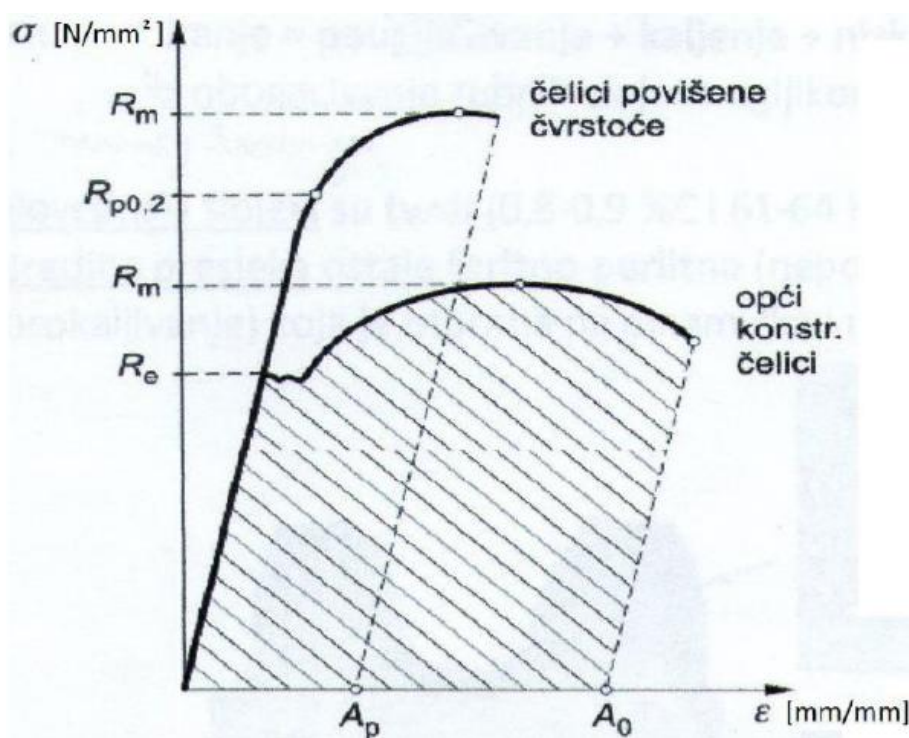
Površinska tvrdoća ARMOX 440T čelika dobivena prema Brinellovoj metodi ispitivanja provedenim od strane proizvođača iznosi 420-480 HB što dokazuje da je ARMOX 440T veoma tvrd čelik. [2]

Ispitivanje udarnog rada loma koja provodi proizvođač napravljena su na temperaturi od -40 °C s epruvetom presjeka 10 x 10 mm i na epruveti je napravljen V utor. Rezultat ispitivanja je da udarna radnja loma na Charpyjevu batu iznosi 25 J. [2]

Sljedeće mehaničko svojstvo koje se ispituje je granica razvlačenja ( $R_e$ ) i vlačna ili rastezna čvrstoća ( $R_m$ ). Granica razvlačenja se definira kao naprezanje pri kojem se epruveta počinje produljivati, a sila se privremeno smanjuje, te je to područje naprezanja koje odvaja područje elastičnih deformacija od područja plastičnih deformacija. Kod konvencionalne granice razvlačenja ( $R_{p0,2}$ ) prilikom rasterećenja epruvete u materijalu ostaje 0,2 % plastične deformacije. Vlačna ili rastezna čvrstoća je naprezanje pri maksimalnoj sili, odnosno to je naprezanje kada se ploha presjeka epruvete od trenutka postizanja maksimalne sile počinje naglo smanjivati pa dovodi do toga da se stvarno naprezanje unatoč smanjenju sile povećava. Danas je to osnovno mehaničko svojstvo preko kojeg se materijali vrednuju prema njihovoj mehaničkoj otpornosti. Konvencionalna granica razvlačenja i vlačna ili rastezna čvrstoća određuju se preko statičkog vlačnog pokusa u kojem porast sile mora biti takav da prirast proizvedenog naprezanja epruvete bude manji od 10 N/mm<sup>2</sup> u sekundi. Statički vlačni pokus izvodi se na kidalici, a rezultati ispitivanja prikazuju se na dijagramu naprezanja – istezanja. Primjer izgleda dijagrama naprezanja – istezanja za oklopne čelike visoke tvrdoće vidi se na slici 7. [7]

Vrijednosti koje daje proizvođač govore da je konvencionalna granica razvlačenja kod ARMOX 440T čelika 1100 MPa, a vlačna ili rastezna čvrstoća je između 1250 i 1550 MPa. Ti podaci potvrđuju iznimna mehanička svojstva ARMOX 440T čelika kao veoma žilavog materijala s visokom mehaničkom otpornošću. [2]





Slika 7. Dijagram naprezanja – istezanja čelika [8]

Statičkim vlačnim pokusom je također utvrđena elongacija ili istezljivost ( $A_5$  ili  $A_{50}$ ). Elongacija ili istezljivost označava relativno produljenje epruvete ispitivanog materijala u aksijalnom smjeru u odnosu na početnu duljinu epruvete. Preko istezljivosti se najjednostavnije i najčešće izražava duktilnost pojedinog materijala. Oznake  $A_5$  i  $A_{50}$  se odnose na dužinu epruvete i to se uzima da je početna dužina epruvete  $L_0$  za  $A_5$  jednaka iznosu dobivenom prema sljedećoj formuli [7]:

$$L_0 = 5,65 \times \sqrt{S_0} \text{ [mm]} \quad [7] \quad (2.1)$$

Gdje je:

$L_0$  – početna duljina epruvete, mm

$S_0$  – površina poprečnog presjeka, mm<sup>2</sup>

Početna dužina epruvete kod  $A_{50}$  je neovisna o površini poprečnog presjeka i iznosi 50 mm.

Formula prema kojoj se izračunava elongacija dana je u sljedećem izrazu [7]:

$$A = \frac{L_U - L_0}{L_0} \times 100\% \quad [10] \quad (2.2)$$

Gdje je:

A – istezljivost ili elongacija, %

$L_U$  – konačna duljina pokidane epruvete, mm

$L_0$  – početna duljina epruvete, mm

Proizvođač prema svojim ispitivanjima daje podatke da ARMOX 440T čelik ima elongaciju  $A_5 = 10 \%$ , a  $A_{50} = 12 \%$ .

#### 2.2.4. Toplinska obrada

Toplinska obrada čelika mora biti ujednačena i jednaka na svim pločama te jednake raspodjele po cijeloj ploči. U nekim slučajevima kada je potrebna povećana tvrdoća pojedinog dijela ploče dozvoljena je nejednolika raspodjela temperature. Temperatura toplinske obrade smije varirati unutar područja od 50 °C na pločama koje se proizvode za razliku od ploča na kojima se testira mikrostruktura.

#### 2.2.5. Rezljivost

Jedna od obrada OČVT-a je rezljivost. Proizvedene čelične oklopne ploče imaju točno propisan kemijski sastav što pojednostavljuje proces rezanja. Međutim, da bi se dobila najbolja kvaliteta reza potrebno je proces voditi pod kontroliranim uvjetima koji će biti navedeni u nastavku.

U tablici 4. prikazani su postupci rezanja koji se koriste za određene debljine ploča.

Tablica 4. Postupci rezanja čelika ARMOX® 440T [2]

	Do 25 mm	25 do 30 mm
<b>ARMOX® 440T</b>	Abrazivni vodeni mlaz	Abrazivni vodeni mlaz
	Plazma	Laser
	Laser	Plinsko rezanje plus predgrijavanje na
	Rezna ploča	170±30 ° C
		Rezna ploča

Radi kontroliranih uvjeta rezanja, oklopne čelike visoke tvrdoće podvrgavaju se sljedećim procesima rezanja [2]:

**Abrazivnim vodenim mlazom** - ovaj proces se može primijeniti na kompletan spektar ARMOX ploča visoke tvrdoće, a preporuča se kao najbolji način, jer kod ovog postupka nema nastanka ZUT-a, a time se eliminira rizik od pucanja.

**Laser za rezanje** - OČVT do oko 20 mm debljine mogu se rezati pomoću ovog postupka. Nastaje vrlo uski rez, širine obično manje od 1 mm, te uski ZUT, čija je širina obično manja od 3 mm.

**Plazma rezanje** - OČVT do oko 25 mm debljine mogu se rezati pomoću ovog postupka. Nastaje rez širine od 3-4 mm i ZUT širine oko 5 mm. Plazma rezanje može biti izvedeno pod vodom, što smanjuje količinu distorzije.

**Plinsko rezanje** - ovaj proces može se primijeniti na OČVT ploče do 60 mm debljine. Nastaje rez širine od 2-5 mm i ZUT koji je obično širine 4-10 mm. Nekontrolirano plinsko rezanje može uzrokovati hladne pukotine na debljinama iznad 20-30 mm. Najučinkovitija metoda kako bi se izbjeglo pucanje tijekom i nakon rezanja je da se ploče predgrijavaju. U nekim slučajevima, ploče velikih debljina koje nisu sklone predgrijavanju mogu se rezati pri malim brzinama, što uklanja potrebu za predgrijavanje.

**Rezanje reznom pločom** - ovaj proces se obično primjenjuje na rezanje cijevi i šipki, ali također se može primjenjivati za pravocrtno rezanje OČVT ploča. Širina reza je debljina rezne ploče, s malo ili bez pojave ZUT-a.

#### **2.2.6. Obrada deformiranjem (savijanje)**

OČVT se podvrgavaju obradi deformiranjem te takvi čelici se do određene mjere mogu savijati. Potencijalni problem je velika tvrdoća koja postavlja relativno visoke zahtjeve za kalup u koji se savija. Rezultati za savijanje ovise o nizu čimbenika koji su grupirani u tri dijela: ploče, alat i postupak. [2]

Ploče:

- s porastom čvrstoće rastu i savojne sile, također treba povećati radijus alata s većom tvrdoćom ploča;
- oštećenja i hrđa na površini ploča mogu uvelike smanjiti savitljivost;
- nakon procesa rezanja rubovi ploče moraju biti pobrušeni i zaobljeni;

- savitljivost ovisi o debljini ploče tako da se tanje ploče mogu saviti na manjim radijusima;
- ako je duljina ploče prilikom savijanja manja od 10 puta debljine ploče, ploča se može saviti na manjem radijusu od propisanog.

Alat:

- odabir pravog radijusa jedan je od najvažnijih faktora prilikom savijanja ARMOX ploča, preporučeno je uzeti isti ili malo veći od propisanog;
- s većom širinom otvora kalupa u kojem se savijaju ploče bit će manje savojne sile.

Postupak:

- radi manjeg trenja na rubovima kalupa nalaze se okrugle šipke preko kojih se savijaju ploče i te okrugle šipke moraju biti neoštećene i čiste;
- kut savijanja ima manje utjecaja na potrebnu silu za savijanje od širine otvora kalupa i razreda čelika;
- sila potrebna za savijanje određuje se pomoću formule ispod, točnost sile je  $\pm 20\%$  pod uvjetom da su vrijednosti uvrštavane u mm;

$$P = \frac{1,6 \times b \times t^2 \times R_m}{10000 \times w} \text{ [N]} \quad (2.3)$$

Gdje je:

$P$ [N]	- sila savijanja
$b$ [mm]	- duljina ploče
$t$ [mm]	- debljina ploče
$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	- vlačna čvrstoća
$w$ [mm]	- širina otvora kalupa

Za čelik ARMOX 440T omjer između polumjera savijanja  $R$  i debljine lima  $t$ ,  $R/t$ , kreće se u rasponu 4 – 4.5 ovisno o debljini i smjeru savijanja. Kut elastičnog povratka iznosi  $11^\circ - 18^\circ$ . [2]

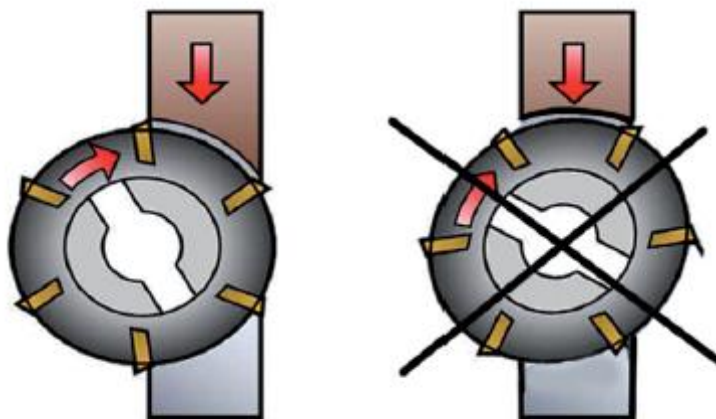
### 2.2.7. Obrada odvajanja čestica

Važno svojstvo ovih čelika je obradljivost odvajanjem čestica u poboljšanom stanju. Preporučeni rezni materijali su brzorezni čelici ili cementirane karbidne prevlake.

Postupci koji se primjenjuju na OČVT-u su pretežito bušenje i glodanje. Za bušenje se koriste svrdla s konusnim držačem. Da bi se smanjila vibracija i produžio vijek trajanja svrdla potrebno je [2]:

- smanjiti udaljenost između vrha svrdla i izratka;
- ne koristiti dulje svrdlo nego je potrebno;
- mali posmak;
- obilno hlađenje kako bi se izbjegao ZUT;
- dobro fiksiran radni komad i dovoljna krutost cijelog radnog stola.

Koriste se još i glodala u procesima obrade odvajanjem čestica. Da bi se osigurala racionalna proizvodnja, preporučuju se glodala s cementirano karbidnim noževima. Koristi se protusmjerno glodalo koje mora biti 20-50 % većeg promjera od debljine koja se reže. Glodalo u zahvatu s obradkom mora biti zamaknuto u stranu kako bi se smanjile sile prilikom rezanja (Slika 8). [2]



Slika 8. Istosmjerno glodalo – pravilno (lijevo) i pogrešno (desno) korištenje [2]

### 3. ZAVARLJIVOST

Nakon što oklopni čelici visoke tvrdoće prođu kroz sve postupke predobrade i postupke provjere mehaničkih svojstava dolaze na završni postupak, a to je spajanje. Svi postupci koji su se do sada proveli bili su nužni kako bi se pripremile čelične ploče za postupak spajanja. Postupak spajanja koji se koristi za oklopne čelike visoke tvrdoće je zavarivanje. Teoretski mogli bi se koristiti i neki drugi postupci ali njihova mehanička svojstva i njihova ekonomska isplativost nisu ni približno toliko dobra kao kod zavarivanja. No kod zavarivanja oklopnih čelika visoke tvrdoće javlja se ključan problem, a to je zavarljivost.

Zavarljivost je definirana preko mnogo parametara i postoji cijelo mnoštvo definicija zavarljivosti no najpotpunija definicija zavarljivosti dana je od strane Međunarodnog instituta za zavarivanje te je nakon toga odobrena i prihvaćena od Međunarodne organizacije za standardizaciju (ISO). Također bitna stavka vezana za definiciju zavarljivosti i njezinu standardizaciju je ta da ne postoji jedinstvena metoda kojom bi odredili zavarljivost pojedinog materijala nego postoji više metoda kojima se može odrediti samo neka svojstva koja su sadržana definicijom koja glasi [9]:

„Komponenta (ili dio) načinjen od metalnih materijala smatra se zavarljivim određenim postupkom kada se uz primjenu pogodne procedure zavarivanjem može postići kontinuitet metalnog materijala. Istovremeno, zavareni spoj mora zadovoljavati postavljene kriterije mehaničkih i metalurških značajki kao i njihov utjecaj na konstrukciju koje je sastavni dio.“

#### 3.1. Mikrostruktura

Mikrostruktura osnovnog materijala je kompleksna zbog proizvodnog procesa koji optimizira relativno male masene udjele legiranih elemenata i tako postiže vrlo dobra svojstva (tablica 3). Stoga se može zaključiti kako je ovakav proces proizvodnje u kombinaciji s balansiranim kemijskim sastavom osnovnog materijala nemoguće postići u zavarenom spoju. Kako bi se postigla potrebna svojstva, u procesu zavarivanja potrebno je dodavati dodatni materijal koji je više legiran zbog toga što su u metalu zavara prisutna samo dva mehanizma očvršnuća: očvršnuće precipitacijom i očvršnuće skrućivanjem u krutoj otopini. Nadalje, kemijski sastav osigurava transformaciju u bainitnu i/ili martenzitnu strukturu metala zavara.

Da bi metal zavora imao optimalna svojstva, potrebno je uzeti u obzir kemijski sastav osnovnog materijala, kemijski sastav dodatnog materijala, njihovo međusobno miješanje i brzinu hlađenja. [10]

### 3.2. Unos topline

Unos topline kod oklopnih čelika visoke tvrdoće, ali i kod svih drugih čelika s poboljšanim svojstvima je veoma bitan parametar. Preveliki unos topline drastično smanjuje mehanička svojstva osnovnog materijala jer mu mijenja mikrostrukturu, dovodi do deformacija materijala, pojave unutarnjih naprezanja i povećava zonu utjecaja topline, a premali unos topline dovodi do naljepljivanja ili nepotpunog protaljivanja. Svaki od postupaka zavarivanja unosi određenu količinu topline u materijal. Ta količina unesene topline prvenstveno ovisi o brzini zavarivanja, naponu zavarivanja, struji zavarivanja, te o samom postupku zavarivanja. Jedinica koja se koristi za označavanje unesene količine topline je količina unesene topline po duljini zavora. Količina unesene topline po duljini zavarenog spoja se dobije preko formule po standardu HRN EN 1011-2. [3]

Određivanje unosa topline u metal zavora moguće je analitički pomoću formule iz norme HRN EN 1011-2. Jedinica koja se koristi je izražena kao unesena toplina po duljini zavarenog spoja.

$$Q = \frac{U \times I}{v_z} \times \eta, \left[ \frac{\text{J}}{\text{mm}} \right] \quad (3.1)$$

Gdje su:  $Q \left[ \frac{\text{J}}{\text{mm}} \right]$  - unesena toplina

$U [\text{V}]$  - napon struje

$I [\text{A}]$  - jakost struje

$v_z \left[ \frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$  - brzina zavarivanja

$\eta$  - koeficijent iskoristivosti topline električnog luka

Tablica 5. Iznos koeficijenta iskoristivosti električnog luka za pojedini postupak [3]

Postupak zavarivanja	Koeficijent iskoristivosti električnog luka ( $\eta$ )
TIG	0,6
REL	0,8
MIG/MAG	0,8
EPP	1

### 3.2.1. Predgrijavanje

Predgrijavanje je toplinska obrada kojom se osnovni materijal zagrijava na neku željenu temperaturu iznad temperature okoline, a provodi se neposredno prije zavarivanja. Predgrijavati se može cijeli komad ili se predgrijava samo dio oko zone zavarivanja. Kao što je bitno predgrijavanje tako je bitno zagrijavanje tijekom zavarivanja, između prolaza, kako temperatura ne bi pala ispod tražene temperature predgrijavanja. O temperaturi predgrijavanja i o međuprolaznoj temperaturi ovisit će mehanička svojstva zavarenog spoja kao i sklonost pukotinama. Uz zavarivanje, predgrijavanje je jedno od važnijih unošenja topline u zavareni spoj.

Predgrijavanje se provodi iz sljedećih razloga [11]:

- Smanjenje brzine hlađenja zavara i osnovnog materijala s ciljem izbjegavanja tvrdih faza u mikrostrukturi;
- Lakše otplinjavanje vodika iz zavarenog spoja;
- Smanjenje naprezanja u zavaru i osnovnom materijalu uslijed stezanja materijala pri hlađenju;
- Postizanje određenih, željenih mehaničkih svojstava zavara koja ovise direktno o mikrostrukturi u zavaru i ZUT-u (udarni rad loma i žilavost);
- Pojedine vrste čelika predgrijavaju se na temperaturu iznad kritične temperature pri kojoj se pojavljuje krhki lom.

Cilj predgrijavanja kod OČVT-a je prvenstveno izbjegavanje hladnih pukotina. Izbjegavanje hladnih pukotina postiže se na način da se omogući izlazak difundiranog vodika iz metala dok se on nalazi na povišenoj temperaturi.

Predgrijavanjem se eliminiraju čimbenici koji uzrokuju hladne pukotine: krhke zakaljane faze, zaostala naprezanja i već navedeni difundirani vodik. [3,12]



### 3.2.1.1. Određivanje temperature predgrijavanja

Kod čelika temperatura predgrijavanja određuje se na temelju debljine osnovnog materijala, kemijskog sastava osnovnog materijala i vrste dodatnog materijala. [11]

Postoji mnogo metoda za određivanje temperature predgrijavanja kao što su metoda Sefferian, BWRA, Itto i Bessyo. U metodama određivanja temperature predgrijavanja utjecaj kemijskog sastava izražava se pomoću ekvivalenta ugljika. Treba napomenuti da se metode ne mogu koristiti bez ograničenja jer daju pouzdane rezultate samo za određene vrste čelika.

OČVT spadaju u grupu niskolegiranih čelika kojima se temperatura predgrijavanja proračunava prema preporuci IIW-a (International Institute of Welding), prema sljedećem izrazu:

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15} \quad (3.2)$$

Ako je ekvivalent ugljika manji ili jednak 0,4 nije potrebno predgrijavanje, a ako je veći treba predgrijavati čelik jer je sklon pukotinama.

Kada je određen ekvivalent ugljika, prema eksperimentalno dobivenim izrazima određuje se kritična brzina hlađenja iznad koje nema opasnosti nastanka hladnih pukotina, a shodno njoj i temperatura predgrijavanja. Temperatura predgrijavanja se može očitati iz odgovarajućih tablica i dijagrama.

Prema podacima proizvođača ARMOX 440T čelik ima ekvivalent ugljika  $CE_{IIW} = 0,67 - 0,73$  ovisno o pojedinoj debljini ploče. Taj ekvivalent ugljika je relativno malen, a usprkos tome čelične ploče nisu izgubile tvrdoću, čvrstoću i balistička svojstva. [2]

### 3.2.1.2. Temperatura predgrijavanja ARMOX 440T čelika

Podaci koje daje proizvođač govore o tome da ukoliko se koristi austenitni dodatni materijal može se zavarivati na temperaturama koje su barem između 18°C i 25°C, no ako je debljina ploča koje se zavaruju veća od 30 mm tada je svakako preporučljivo predgrijavanje. [2]

Ako se koristi nelegirani ili niskolegirani dodatni materijal nužno je vršiti predgrijavanje ovisno o debljini ploča i vanjskim uvjetima. [2]

Temperatura predgrijavanja mora biti konstantna kroz cijeli postupak zavarivanja tj. mora se održavati sve od zavarivanja korijena pa do posljednje popune. [2]

Preporuka proizvođača ARMOX ploča je da se ne pregrijavaju iznad 200°C. Debljine od 10-30 mm se predgrijavaju na temperaturu oko 125°C, od 30-35 mm na temperaturu oko 150°C, a veće debljine do max. temperature predgrijavanja ARMOX ploča, odnosno do 200°C. [2]

### 3.3. Greške u zavarenom spoju

Greške koje nastaju u zavarenom spoju predstavljaju veliki problem jer posljedice koje mogu prouzročiti mogu dovesti do uništenja cijele konstrukcije. Kako bi se što bolje razumjele greške koje nastaju u zavarenom spoju one su prema preporuci „Međunarodnog instituta za zavarivanje“ (IIW – International Institute of Welding) podijeljene u šest skupina koje su definirane normama HRN EN ISO 6520-1:2008. [13]

Tablica 6. Podjela grešaka u zavarenim spojevima [14]

Osnovna grupa	Oznaka grupe	Vrsta pogreške
1	100	Pukotine
2	200	Šupljine i poroznost
3	300	Čvrsti uključci
4	400	Nepotpuno spajanje i protaljivanje
5	500	Nepravilni oblik i dimenzije
6	600	Ostale nepravilnosti

Navedene grupe pogrešaka najčešće se detektiraju pomoću nerazornih metoda ispitivanja i to su greške koje nastaju kod zavarivanja te se nazivaju proizvodnim greškama.

Kod zavarivanja oklopnih čelika visoke tvrdoće najčešća vrsta grešaka su pukotine pa ih zbog toga treba posebno proučiti i pokušati ih u što većoj mjeri spriječiti. Pukotine koje se najčešće javljaju kod zavarivanja oklopnih čelika visoke tvrdoće su hladne pukotine pa je upravo njih potrebno detaljnije proučiti.

#### 3.3.1 Hladne pukotine

Hladne pukotine su pukotine koje nastaju pri hlađenju zavarenog spoja pri temperaturama nižim od 200 °C te pri sobnoj temperaturi nakon određenog perioda inkubacije koji iznosi 48 sati nakon zavarivanja.

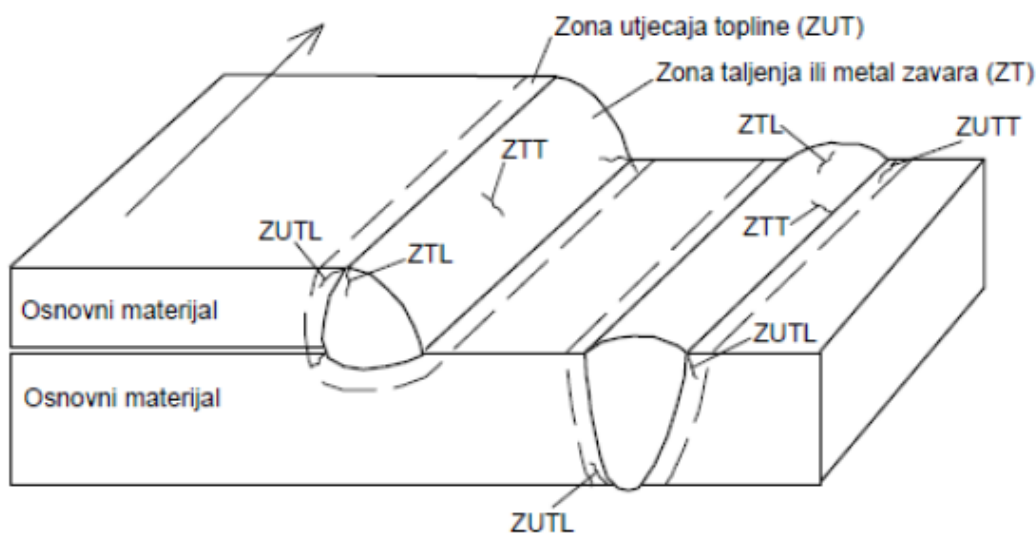
Pojava hladnih pukotina uzrokovana je djelovanjem više čimbenika kao što su:

- struktura
- prisutnost difuzijskog vodika
- zaostala naprezanja

Da bi se identificirale hladne pukotine potrebno je nerazorna ispitivanja provoditi 48 sati nakon zavarivanja.

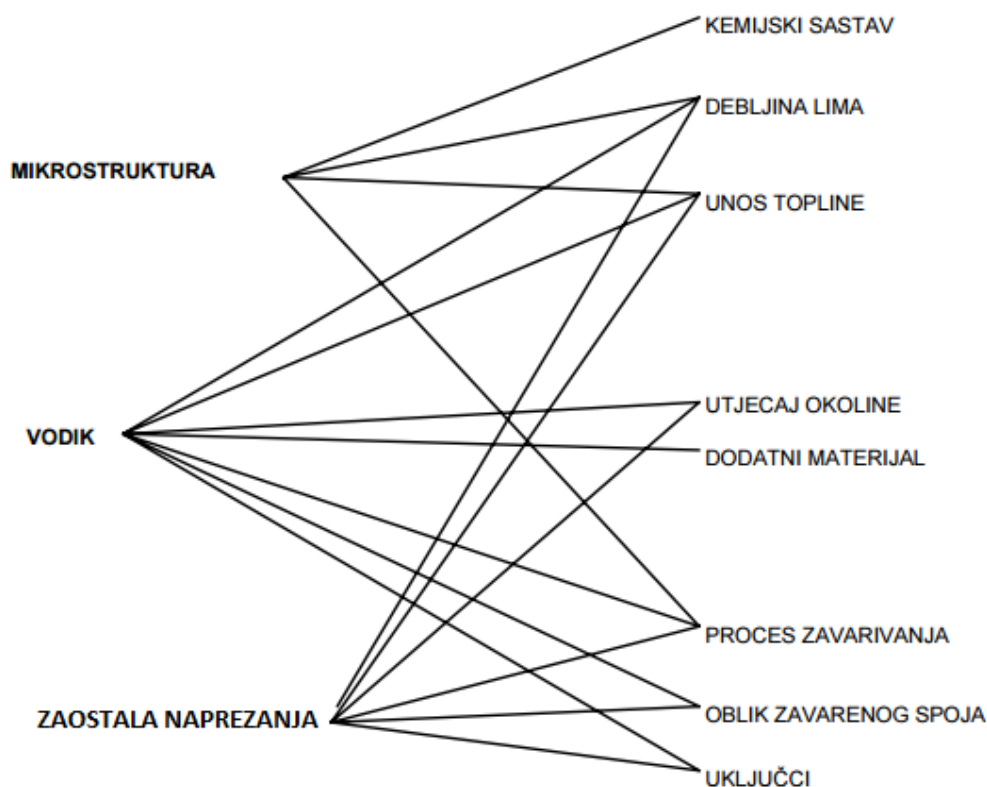
Hladne pukotine mogu se manifestirati u samom zavaru te u području zone utjecaja topline (ZUT). Orijentacija hladnih pukotina može biti poprečna na smjer zavarivanja, a to su transversalne (T) pukotine ili paralelna sa smjerom zavarivanja koje se još nazivaju longitudinalne (L) pukotine, a ima i slučajeva kada se pojavljuju pod nekim kutom u odnosu na smjer zavarivanja kao što se može vidjeti na slici 9. [15]

Kod oklopnih čelika visoke tvrdoće zona utjecaja topline je otpornija na pojavu hladnih pukotina od samog metala zavora. Manja otpornost metala zavora je upravo zbog toga jer je metal zavora više legiran i karakterizira ga heterogena mikrostruktura pa smjernice koje postoje za izbjegavanje hladnih pukotina u zoni utjecaja topline ne mogu se primjenjivati i na područje metala zavora. Sklonost pojavi hladnih pukotina metala zavora povećava se povećanjem čvrstoće čelika, udjela vodika i debljine radnog komada. [16]



Slika 9. Mjesta nastanka i orijentacija hladnih pukotina prema IIW [15]

Prikaz utjecaja pojedinih čimbenika na nastajanje hladnih pukotina može se vidjeti na slici 10.



Slika 10. Utjecajni čimbenici nastanka hladnih pukotina [15]

#### 3.3.1.1. Utjecaj strukture na pojavu hladnih pukotina

Struktura utječe na stvaranje hladnih pukotina indirektno. Vodik je glavni krivac koji uzrokuje hladne pukotine pa se zato one još nazivaju i vodikovim pukotinama. Struktura utječe tako da različita kristalna struktura omogućava različitu rastvorljivost vodika. Poznato je da austenitna struktura ima FCC rešetku, a feritna struktura ima BCC rešetku. Razlika između FCC i BCC rešetke je u razmaku između atoma željeza. BCC rešetka ima veći razmak između atoma željeza pa ona omogućava veću mobilnost atoma vodika. Veća mobilnost znači da je moguća manja rastvorljivost vodika u BCC rešetci nego u FCC. Zbog povećane rastvorljivosti vodika u austenitu postiže se velika koncentracija vodika u samoj kristalnoj rešetci, a taj vodik koji se nalazi u austenitu ostaje također zarobljen u martenzitu kada se dogodi pretvorba austenita u martenzit pa je zbog toga učestalost hladnih pukotina u martenzitu povećana. Također je učestalost hladnih pukotina mnogo veća u feritnim čelicima nego u austenitnim čelicima. [16]

### 3.3.1.2. Utjecaj zaostalih naprezanja na stvaranje hladnih pukotina

Zaostala naprezanja koja uzrokuju hladne pukotine mogu se podijeliti u tri skupine: [17]

- Izravna
- Neizravna
- Vanjska

Izravna naprezanja koja djeluju lokalno na zavareni spoj nalaze se u njegovoj neposrednoj blizini. Posljedica su brzog lokalnog zagrijavanja i potom naglog hlađenja zavarenog spoja, a uzrok nastajanja je postojanje temperaturnog gradijenta materijala koji se zavaruje i djelovanje naprezanja uzrokovanih utjecajem strukturnih pretvorbi.

Neizravna naprezanja posljedica su vanjskih ukrućenja. Nastaju tijekom procesa u procesu zavarivanja i njima se može djelomično upravljati još u fazi projektiranja.

Vanjska naprezanja su naprezanja koja djeluju na zavareni spoj tijekom njegove izvedbe i mogu djelovati na zavareni spoj tijekom zavarivanja. Uzroci vanjskih naprezanja su djelovanje težine dijelova koji se spajaju, djelovanje elastičnih veza među dijelovima, iskrivljenjem zbog drugih nanesenih zavora u procesu hlađenja i drugi razlozi koji unose naprezanja u zavar izazvana okolinom.

### 3.3.1.3. Utjecaj difuzijskog vodika na stvaranje hladnih pukotina

Utjecaj difuzijskog vodika na stvaranje hladnih pukotina klasificiran je u dvije grupe:

1. Kvazi-krhki lom visokočvrstih materijala koji se može pojaviti kod relativno niskih koncentracija vodika. Takva pojava naziva se vodikovom krhkosti.
2. Pojava mjehurića (eng. *blister*) na površini te kao unutrašnje pucanje na mjestima uz sulfidne ili ostale uključke.

Rezultati ispitivanja koja su se provodila u posljednje vrijeme upućuju na to da je martenzitna struktura najosjetljivija na pojavu hladnih pukotina u području metala zavora. Kako je kod oklopnih čelika visoke tvrdoće udio ugljika relativno malen neće se u području zavarenog spoja stvoriti velika količina martenzita, no usprkos tome osjetljivi su na pojavu hladnih pukotina. Ta sklonost hladnim pukotinama objašnjava se kroz postojanje zaostalog austenita. Naime, zaostali austenit sadrži velike koncentracije vodika i može ih otpuštati u ostatak

martenzitne matrice kroz cijeli životni vijek. Još jedno svojstvo zaostalog austenita predstavlja problem kod zavarenih spojeva, a to je da je zaostali austenit izrazito nestabilna mikrostruktura te se kod veoma malih promjena radnih temperatura ili malog plastičnog naprezanja može pretvoriti u martenzit. Kada se zaostali austenit pretvori u martenzit dolazi do velikog oslobađanja difundiranog vodika u martenzitu mikrostrukturu te se tako povećava sklonost nastajanju hladnih pukotina.

### 3.4. Tehnologija zavarivanja

Postupak zavarivanja i zavarljivost oklopnih čelika visoke tvrdoće najveći je problem ispravne upotrebe samih čeličnih ploča. Mikrostruktura zavarenog spoja i dovoljno dobra mehanička svojstva metala zavara uz dobra balistička svojstva osnovni su preduvjet za postizanje ispravne konstrukcije. [3]

Proizvođač materijala vrši različita ispitivanja preko kojih određuje količinu maksimalne i minimalne unesene topline u čijem rasponu neće doći do neprihvatljive degradacije materijala. Proces hlađenja promatra se unutar vremenskog perioda  $t_{8/5}$ . Taj vremenski period označava vrijeme potrebno da temperatura zavarenog spoja padne s 800 °C na 500 °C. U tom vremenskom intervalu se određuje mogućnost nastanka mikrostrukturnih promjena. [3]

Kao što proizvođač osnovnog materijala vrši svoja ispitivanja tako i proizvođač dodatnog materijala ima svoja ispitivanja prema kojima određuje da li njegov proizvod zadovoljava potrebna svojstva propisana normom za dodatne materijale. [3]

Osnovni problem zavarivanja se javlja kada se u realnoj proizvodnji osnovni i dodatni materijal počinju miješati i tvoriti zavar. To se sve događa tijekom zavarivanja određenim postupkom zavarivanja kojeg bira sam izvođač radova koji opet ima svoje standarde i norme koje mora poštivati. Tako dobiveni zavareni spoj, zbog različitosti materijala i nepredvidivosti, mora se ispitati na terenu i upravo ta mehanička svojstva koja se dobiju su glavni pokazatelji kvalitete zavarenog spoja. [3]

Zbog svega navedenog kod zavarivanja oklopnih čelika visoke tvrdoće potrebno je paziti na sljedeće stvari: [3]

1. Obratiti pozornost na postojanje određenog miješanja osnovnog materijala i metala zavara, ovisno o zavarivačkom procesu i parametrima zavarivanja. To bi značilo da se

zbog miješanja osnovnog i dodatnog materijala može dogoditi da se dobije potpuno drugačiji kemijski sastav zavarenog spoja od onoga koji je propisan od strane proizvođača dodatnog materijala. Ako je kemijski sastav drugačiji od navedenog onda to podrazumijeva da će i mehanička svojstva biti bitno drugačija nego ona koja su deklarirana od strane proizvođača dodatnog materijala. Kako bi se taj problem riješio, danas sve više dodatnih materijala ima propisan kemijski sastav, a ne samo mehanička svojstva što značajno olakšava izbor dodatnog materijala i ostvarivanje potrebnih mehaničkih svojstava zavarenog spoja.

2. Sljedeće što treba znati da se ovisno o debljini limova primjenjuju različite tehnike zavarivanja. Za tanje limove preporučeno je zavarivanje u jednom prolazu, za deblje limove u dva prolaza, a za debele limove zavarivanje se vrši u više prolaza. Način zavarivanja tj. broj prolaza određuje mehanička svojstva zavarenog spoja. Kod zavarivanja u jednom prolazu, mikrostruktura je usporediva s mikrostrukturom lijevanog čelika bez toplinske obrade. Kada se zavaruje u više prolaza svaki sljedeći prolaz odžaruje prethodni pa se postiže mikrostruktura koja više liči mikrostrukтури poboljšanog čelika. U slučaju višeprolaznog zavarivanja događaju se slične pojave u zoni utjecaja topline prethodnih prolaza. Za postizanje sitnozrnatosti u metalu zvara koristi se zavarivanje u mnogo tankih prolaza.

Najveći utjecaj u zavarivačkom procesu ima podešavanje parametara kao što su jakost struje, brzina dodavanja žice i brzina zavarivanja. Za unos topline potrebno je paziti da bude prilagođen debljini osnovnog materijala kako bi se postigla optimalna svojstva procesa. [3]

Još jedan od bitnih stavki je držanje pod kontrolom unos vodika u metal zvara. Kao što se moglo vidjeti u prethodnom tekstu vodik uzrokuje velike probleme pa ga je potrebno što više ograničiti.

Iako proizvođač ARMOX 440T čelika navodi da su ti čelici napravljeni za sve postupke zavarivanja, zbog problema koji se mogu pojaviti, u daljnjem tekstu će se obraditi dva postupka zavarivanja s kojima će biti izveden eksperimentalni dio.

## 4. MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA

Zavarivanje oklopnih čelika visoke tvrdoće moguće je provesti sa svim postupcima zavarivanja. Naime, gledajući na produktivnost, isplativost, i relativno mali unos topline kao i kriterij da unos vodika kroz zaštitni plin i/ili dodatni materijal mora biti manji od 5 ml na 100 g metala, iz tog slijedi da MAG postupak odgovara ovim kriterijima.

### 4.1. O postupku

MAG (engl. Metal Active Gas) zavarivanje je elektrolučni postupak zavarivanja taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina. Najčešći plinovi koji se koriste za MAG zavarivanje su argon i ugljikov dioksid te njihove mješavine. Električni luk se uspostavlja između žice koja je dodatni materijal i ujedno elektroda i osnovnog materijala te tako uzrokuje taljenje te žice i osnovnog materijala te formiranje zavarenog spoja. Postupak zavarivanja može biti automatski (potpuno mehaniziran), poluautomatski (dodavanje žice je mehanizirano, a vođenje i držanje pištolja je ručno) te robotizirano. [18]

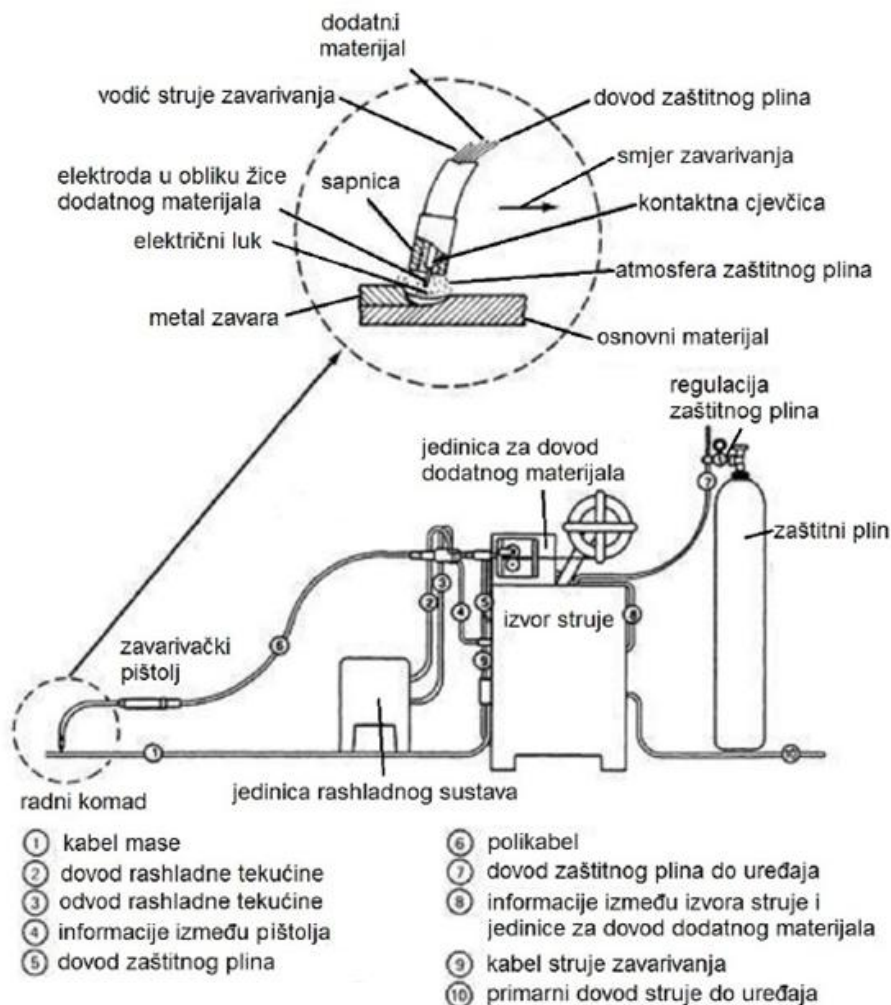
MAG postupak zavarivanja je iznimno kompleksan i precizan postupak i zahtijeva precizno funkcioniranje svih njegovih komponenti. Za bolju predodžbu postupka na slici 11. prikazan je shematski prikaz MAG postupka.

Način rada MAG postupka, prikazan na slici 11., bazira se na istodobnom dovođenju žice, koja se nalazi na kolutu s žicom, zaštitnog plina, koji je pohranjen u čeličnoj boci i dovodi se preko sapnice u područje zavarivanja, i struje zavarivanja, koja se kabelima dovodi od izvora napajanja do pištolja za zavarivanje. Struja zavarivanja se kontaktnom cjevčicom prenosi na žicu koja zatim zatvara strujni krug preko radnog komada. Radni komad je spojen s masom na izvor napajanja i tako je strujni krug zatvoren u potpunosti što omogućuje zavarivanje.

Zavarivanje u nekim slučajevima velikih radnih komada može biti otežano i to tako da je nemoguće ili veoma komplicirano dovesti izvor napajanja do mjesta zavarivanja pa su potrebni koaksijalni kabeli za veću udaljenost. U takvim slučajevima kada je udaljenost veća od 5 metara primjenjuje se dodatni pogon za dodavanje žice smješten u samom pištolju. Taj pogon se koristi da bi se spriječilo gužvanje žice unutar cijevnog vodiča, a isto tako se koristi i kod nekih specijalnih načina zavarivanja za precizno dodavanje dodatnog materijala. Takav



sistem se zove „push-pull“ sistem i još mu je bitna primjena kod manjih debljina žica i kod dodatnih materijala koji su mekši poput aluminija i njegovih legura.[19]



Slika 11. Shematski prikaz MAG postupka zavarivanja [3]

## 4.2. Parametri zavarivanja

Da bi se postupak zavarivanja uspješno proveo potrebno je prilagoditi različite parametre na propisane vrijednosti ili eksperimentalno odrediti potrebne parametre kako bi zavareni spoj imao najbolja svojstva. Glavni parametri procesa su struja, napon, brzina zavarivanja, slobodni kraj žice i promjer elektrode. Postoje i drugi parametri kao što je orijentacija elektrode i vrsta elektrode koji također utječu na mehanizam prijenosa materijala. Navedeni parametri nisu međusobno neovisni. Struja i napon ovise o izlaznim karakteristikama izvora, a napon ovisi ne samo o duljini luka već i o slobodnom kraju žice i o vrsti zaštitnog plina. [21]

Neki od navedenih parametara bit će obrađeni u daljnjem tekstu.

#### **4.2.1. Napon zavarivanja**

Napon struje zavarivanja je jedan od glavnih parametara. Njegovim povećanjem povećava se duljina električnog luka i dobije se šira talina, odnosno širi zavareni spoj. Ukoliko zavareni spoj ima ugorine to je znak da je napon previsok. Veći napon kod kratkog električnog luka će smanjiti frekvenciju kratkih spojeva što ima za posljedicu povećanje kapljica rastaljenog materijala pa dolazi do povećanog prskanja, a s druge strane prenizak napon može uzrokovati ulijetanje nerastaljene žice u talinu te otežano uspostavljanje električnog luka. [3]

Napon je veoma bitan faktor kod zavarivanja tankih radnih komada. Na tim komadima je potrebno imati kratki električni luk koji omogućava brže zavarivanje bez opasnosti od propaljivanja, no da bi se to ostvarilo potrebno je frekvenciju držati dovoljno visokom da bi se dobio stabilan električni luk. Također je napon bitan kod formiranja kutnih spojeva jer u tom slučaju moraju se dobiti blagi prijelazi kako ne bi došlo do nepovoljnih zarezni djelovanja. [3]

#### **4.2.2. Struja zavarivanja**

O jakosti struje zavarivanja direktno ovisi količina rastaljenog materijala. U skladu s time, brzina dodavanja žice i njezin poprečni presjek određuju potrebnu količinu dodanog materijala za određenu jakost struje. Dakle, veći promjer žice i veća brzina zavarivanja povećavaju ekonomičnost postupka što je danas veoma bitno.

#### **4.2.3. Promjer dodatnog materijala**

Kao što je u prethodnom tekstu rečeno promjer dodatnog materijala uzima se s obzirom na jakost struje. Kod MAG postupka za razliku od ručnog elektrolučnog postupka promjer dodatnog materijala ne određuje jakost struje. Kod ručnog elektrolučnog postupka promjer dodatnog materijala je direktno određivao jakost struje i to tako da se uzima jakost struje otprilike 30-40 puta veća nego je sam promjer, no kod MAG postupka za jednak promjer dodatnog materijala mogu se koristiti različiti iznosi struje. Zbog širokog pojasa struja koje se mogu koristiti kod nekog promjera potrebno je znati da je prijenos materijala kod zavarivanja tanjom žicom stabilniji. [3]

#### **4.2.4. Induktivitet**

Za ispravno postavljanje parametara zavarivanja za određeni promjer žice potrebno je koristiti ispravan induktivitet. Kratak električni luk je vrlo osjetljiv na induktivitet. Niske vrijednosti induktiviteta će imati prepoznatljiv zvuk i pružit će koncentrirani električni luk, ali u isto vrijeme će se povećati prskanje. Veće vrijednosti induktiviteta daju mekši zvuk te povećavaju širinu taline. Sam efekt induktiviteta moguće je poništiti ukoliko se povećaju kapljice rastaljenog materijala. [3]

#### **4.2.5. Slobodni kraj žice**

Slobodni kraj žice je onaj dio žice koji viri od kraja kontaktne cjevčice. Obično iznosi 5mm do 15mm odnosno do 25mm za druge vrste prijenosa materijala (mješoviti, štrcajući luk). Prekratak slobodan kraj žice povećava rizik od zataljivanja elektrode za kontaktnu cjevčicu, dok predugačak povećava rizik od upadanja nerastaljene žice u talinu, posebno na početku zavarivanja.

Udaljenost kontaktne cjevčice, koja ovisi i o duljini slobodnog kraja žice, ima utjecaj na jakost struje i dubinu penetracije. Ukoliko je slobodni kraj žice povećan, jakost struje, a time i unos topline se smanjuje dok količina depozita ostaje ista. Ovime se smanjuje penetracija i dalje povoljan metal zavara u pogledu kemijskog sastava. Dobro je pridržavati se pravila da duljina slobodnog kraja žice tijekom zavarivanja treba biti konstantna. [3]

#### **4.2.6. Zaštitni plinovi**

Zaštitni plinovi kod MAG postupka bitno određuju kvalitetu zavarenog spoja. Njihova glavna svrha je da zaštite talinu zavara kod skrućivanja. Odabir zaštitnog plina treba biti veoma dobro proučen jer pravilan odabir plina može rezultirati većom brzinom zavarivanja te većom količinom depozita. Kao zaštitni plinovi koriste se čisti plinovi kao što su argon i ugljikov dioksid CO<sub>2</sub>, ali također i njihove mješavine. Svaki od plinova ima neke prednosti i nedostatke koji utječu na postupak zavarivanja. Njihovom kombinacijom nastoji se dobiti idealan zaštitni plin za svaki postupak. Sljedeći uvjet za pouzdan plin je nivo čistoće samog plina. To se zahtijeva zato jer i mali postotak vlage može prouzročiti poroznost ili apsorpciju vodika u metal zavara. Točka rosišta plina mora biti ispod -40 °C da ne dođe do rošenja i tako dovodenja vlage u zavareni spoj. Kod svakog postupka zavarivanja veoma je bitno paziti na

stanje opreme kojom se zavaruje, pa tako i na boce i spremnike, ventile te cijevi kojima se dovodi plin kako bi se dobio kvalitetan zavareni spoj.

Protok zaštitnog plina koji se koristi kod zavarivanja ovisi o promjeru žice, jakosti struje zavarivanja, obliku spoja, mjestu i uvjetima zavarivanja. Prilikom zavarivanja kratkim spojevima i mješovitim lukom optimalna količina zaštitnog plina trebala bi iznositi 10 puta promjer žice. Kod štrcajućeg i impulsnog luka zbog većih struja i veće brzine zavarivanja koristi se veći protok zaštitnog plina.[3]

U tablici 7. prikazana je ovisnost protoka zaštitnog plina o debljini žice kod konvencionalnog postupka MAG zavarivanja.

Tablica 7. Ovisnost protoka zaštitnog plina o debljini žice [2]

Promjer žice, mm	Potrošnja plina, l/min
0,8	6 - 8
1,0	9 - 10
1,2	10 - 12
1,6	14 - 16

#### 4.2.7. Položaj i njihanje pištolja za zavarivanje

Položaj zavarivačkog pištolja je također bitan parametar jer o njemu ovisi dubina i širina zavara. Kod lijeve tehnike zavarivanja zavareni spoj će biti plići i širi, dok kod desne tehnike dublji i uži. Ukoliko je nagib pištolja pogrešan može dovesti i do pojave naljepljivanja.

Njihanje pištolja se prvenstveno koristi za premošćivanje većih zazora, za bolju popunu tj. veću količinu depozita te za dobivanje željenog izgleda završnog prolaza. Njihanjem se kontrolira talina i postižu željeni efekti zavarenog spoja. [3]

#### 4.3. Prednosti i nedostaci MAG postupka zavarivanja

Svaki postupak zavarivanja ima prednosti i nedostatke, pa tako i MAG postupak. Prednosti MAG postupka zavarivanja u odnosu na ostale postupke [11]:

- mogućnost zavarivanja svih vrsta materijala,
- veliki raspon mogućih parametara i načina prijenosa metala,
- mogućnost zavarivanja u svim položajima,

- mogućnost primjene različitih plinskih mješavina,
- široki raspon debljina osnovnog materijala,
- zavarivanje u radionici i na terenu,
- visoka učinkovitost i produktivnost,
- visoka kvaliteta metala zavara,
- pogodni za automatizaciju.

Nedostaci MAG postupka zavarivanja u odnosu na ostale postupke [11]:

- mogućnost grešaka kod rada na terenu,
- problemi kod dovoda žice – mehanički problem,
- veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja (naljepljivanje, poroznost, ugorine, uključci troske),
- štrcanje kod zavarivanja kratkim spojevima i troska kod FCAW postupka (gubici i potrebna naknadna obrada),
- složeniji uređaji (automatsko dovođenje žice, regulacija visine električnog luka, mikroprocesorsko upravljanje).

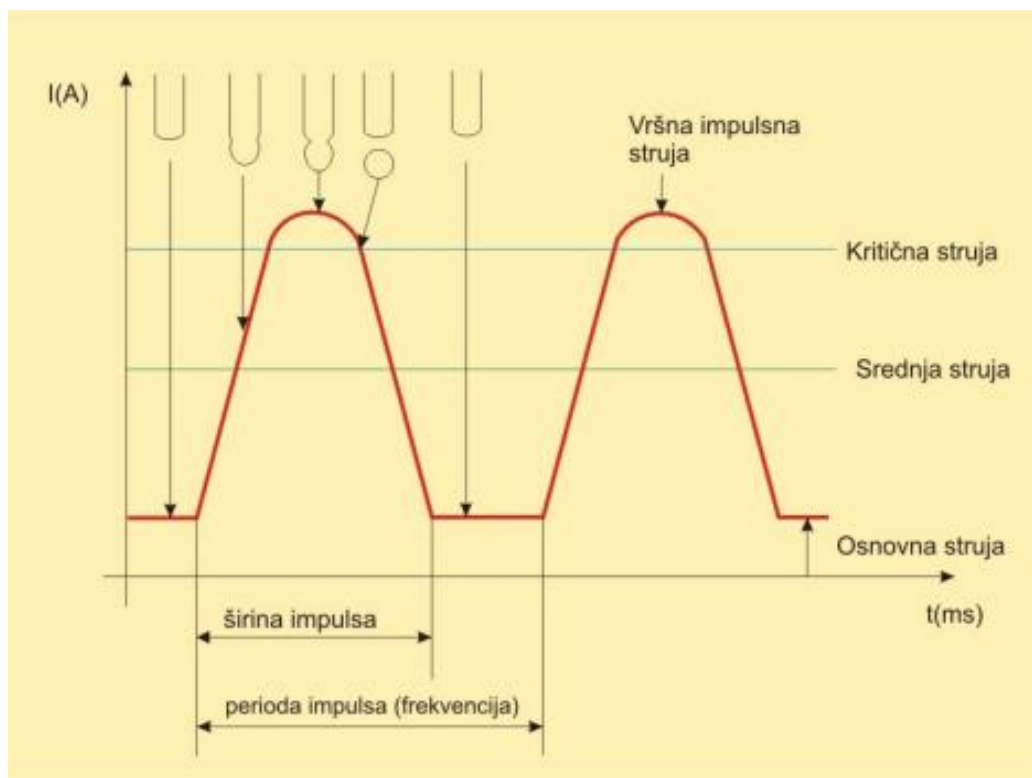
#### **4.4. MAG postupak zavarivanja OČVT**

Kod zavarivanja čelika visoke tvrdoće najčešće upotrebljavani postupak je MAG. MAG postupak ima prednost nad drugim postupcima zbog svoje brzine, a uz brzinu daje zadovoljavajuću kvalitetu zavarenog spoja. Kod zavarivanja elektrolučnim postupkom bitno je da svojstva zavarenog spoja budu barem jednaka ako ne i bolja od osnovnog materijala. Impulsno MAG zavarivanje je MAG zavarivanje određenim načinom prijenosa metala koje koristi specifične parametre koji mu omogućuju brzo, pouzdano i točno zavarivanje. U nastavku teksta bit će objašnjen MAG postupak sa impulsnim prijenosom metala koji je korišten za spajanje uzoraka u eksperimentalnom dijelu.

##### **4.4.1. Impulsno MAG zavarivanje**

Kod ovog postupka izvor struje generira promjenljiv oblik struje (impuls), koji omogućava otkidanje samo jedne kapljice tijekom impulsa, a količina prijenosa materijala se regulira promjerom žice i brojem impulsa (frekvencijom).

Struja se periodički mijenja između osnovne i vršne te time dopušta prijenos metala tijekom pulsa velike struje, no sa sveukupno manjim unosom topline od štrcajućeg luka. Mikroprocesor kontrolnog sustava proračunava parametre pulsa potrebne za zadani promjer elektrode, tip materijala i zaštitni plin te frekvenciju potrebnu kako bi se električni luk održao konstantnim. Puls izvora struje uzrokuje otkidanje kapljice s vrha elektrode istom brzinom kojom se i dodaje. Ovim načinom se osigurava stabilan i miran električni luk, praktički bez rasprskavanja. Slika 12. prikazuje grafički prikaz impulsnog postupka. [3]



Slika 12. Grafički prikaz impulsnog postupka i načina otkidanja kapljice [15]

Prednosti ovog načina prijenosa metala su mogućnost zavarivanja u svim položajima i zavarivanje šireg raspona debljina materijala žicama istog promjera. Ovaj način prijenosa materijala je zanimljiv za zavarivanje OČVT-a zbog velike kontrole unosa topline.

#### 4.4.1.1. Određivanje osnovnih parametara impulsnog MAG zavarivanja

Kod impulsnog MAG zavarivanja pozornost treba posvetiti osnovnoj struji. Ona mora biti tako odabrana da nakon što dođe do prestanka impulsa strujni krug bude i dalje neprekinut tj. da se ne prekine električni luk. Područje vrijednosti osnovne struje je između 40 i 50 A. Trajanje impulsa namješta se tako da u jednom impulsu se odvoji jedna kapljica rastaljenog

materijala jer se u suprotnom može dogoditi da u jednom impulsu poleti više kapljica što bi izazvalo prskanje.

Nagib pištolja u odnosu na osnovni materijal je važan parametar. Postoji lijeva i desna tehnika, a ukoliko se koristi lijeva tehnika rada, zavar ce biti plići i širi. Desna tehnika rada će dati dublju penetraciju i uži zavar. Nagibi pištolja značajno mogu utjecati na naljepljivanje što je problem kod zavarivanja OČTV-a, naime primarno je unijeti optimalnu količinu topline u osnovni materijal kako on ne bi izgubio početna svojstva, a zavar bi zadovoljio propisane kriterije.

#### **4.4.2. Izbor vrste i količine zaštitnog plina**

Zaštitni plinovi koji se koriste kao zaštitna atmosfera kod MAG postupka zavarivanja najčešće su dvokomponentne ili trokomponentne plinske mješavine. Plinovi koji se upotrebljavaju u višekomponentnim zaštitnim plinskim mješavinama su: argon, ugljični dioksid, kisik, vodik i/ili dušik. Kao jednokomponentni zaštitni plin mogu se koristiti samo argon i ugljični dioksid. Dok se kisik, vodik i dušik koriste samo u višekomponentnim zaštitnim plinskim mješavinama s malim volumnim udjelima radi negativnih utjecaja. Vrste zaštitnih plinova definirane su normom HRN EN ISO 14175 - Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje - Plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i srodne postupke (ISO 14175:2008; EN ISO 14175:2008).

Glavna svrha zaštitnog plina je zaštita taline zavara pri skrućivanju u postupku zavarivanja. Odabiru zaštitnog plina se često ne posvećuje dovoljno pažnje; pravilan odabir može povećati brzinu zavarivanja, količinu depozita i udio legiranih elemenata. [11]

Izbor zaštitnog plina se provodi na temelju osnovnog i dodatnog materijala, debljine obradka, željenih svojstava zavara, pripreme zavara, položaja zavarivanja, željenog režima rada i dr. Gustoća plina utječe na učinkovitost zaštite taline metala zavara. Plinovi teži od zraka imaju tendenciju padanja uz stup električnog luka, što pospješuje učinak zaštite taline metala zavara kod zavarivanja u horizontalnom položaju. Kako bi se osigurala ispravna zaštita taline metala zavara, odabirom zaštitnog plina koji je teži od zraka (argon, ugljični dioksid), treba podesiti manji protok zaštitnog plina pri postupku zavarivanja. Ovisno o tome koji se materijal zavaruje, i kojim postupkom zavarivanja, vrlo male količine nečistoća u zaštitnome plinu mogu značajno utjecati na brzinu zavarivanja, izgled površine zavara, skrućivanje zavara i poroznost zavara. Iz tog razloga je vrlo bitno kontrolirati koji plin se koristi prilikom zavarivanja te da li zadovoljava normama propisanu minimalnu čistoću.

Kod MAG postupkom zavarivanja ugljičnih čelika najčešće se koristi dvokomponentna mješavina zaštitnih plinova Ar + CO<sub>2</sub>. Ova mješavina zaštitnih plinova podržava sve načine prijenosa metala. Kod impulsnog načina prijenosa metala zahtijeva da u zaštitnoj plinskoj mješavini Ar + CO<sub>2</sub>, udjel CO<sub>2</sub> bude jednak ili manji od 18 %. Povećanjem udjela CO<sub>2</sub> povećan je unos topline tijekom postupka zavarivanja, a time i opasnost od progaranja. Najpopularnija dvokomponentna mješavina zaštitnih plinova za zavarivanje je mješavina 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub>. [11]

#### **4.4.3. Izbor dodatnog materijala**

Izbor dodatnog materijala za zavarivanje ovisi o mnogim parametrima, a glavni su cijena, kvaliteta, produktivnost, zaštitni plin, materijal i debljina radnog komada. Postoje vrlo kvalitetni dodatni materijali koji se proizvode u strogo kontroliranim uvjetima i nemaju nečistoća, ali su skupi. S druge strane, postoje i jeftiniji koji se proizvode iz rude ili recikliranjem čelika, ali su slabije kvalitete i produktivnosti.

Da bi se pristupilo odabiru dodatnog materijala potrebno je prvo odrediti osnovni materijal i debljinu osnovnog materijala, odrediti postupak zavarivanja, vrstu spoja te definirati zahtjeve na zavareni spoj. Zahtjevi koje je potrebno definirati mogu se podijeliti na sljedeće skupine [22]:

1. Otpornost na pojavu pukotina,
2. Zahtjev na čvrstoću i duktilnost,
3. Zahtjev na korozijsku otpornost,
4. Svojstva materijala na povišenim temperaturama.

Kod odabira dodatnog materijala za zavarivanje bitno je za napomenuti kako često se odabire dodatni materijal koji nema ista svojstva kao i osnovni materijal. Kada se odabire takav dodatni materijal s različitim svojstvima potrebno je izabrati materijal koji ima bolja svojstva i koji će podići svojstva zavarenog spoja tako da mu poboljša čvrstoću, otpornost na pojavu pukotina, otpornost na pojavu korozije te statičku izdržljivost.[23]

MIG postupak zavarivanja koristi za dodatni materijal žicu namotanu na kolut. Ta žica je ujedno i anoda u električnom luku. Promjeri koji se koriste ovise o potrebi za depozitom i o debljini osnovnog materijala, a mogu biti od 0,8 mm do 3,2 mm. Dodatni materijal kao i kod svakog drugog postupka potrebno je čuvati u suhim i čistim uvjetima.[23]



Prema do sada iznesenim činjenicama odabire se dodatni materijal za zavarivanje osnovnog materijala, čelika ARMOX 440T, koji se koristi u eksperimentalnom dijelu, a na temelju iskustva i mogućnosti tvrtke, kao i zahtjeva kupca proizvoda za zavarivanje je izabran dodatni materijal Interfil 307 i MG2.

OERLIKON Interfil 307 je dodatni materijal u obliku žice od nehrđajućeg čelika koja je prikladna za zavarivanje različitih čelika, u koju grupu spada i balistički čelik odnosno oklopni čelik visoke tvrdoće. Uobičajena primjena je za zavarivanje međuprolaza. Ima jako dobra mehanička svojstva i otpornost na habanje. Na slici 13. prikazan je certifikat o sastavu i svojstvima dodatnog materijala kojim potvrđuje kemijska i mehanička svojstva dodatnog materijala.

OERLIKON MG-2 je dodatni materijal u obliku bakrene žice koja je prikladna za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika. Može se koristiti za jedan prolaz i za više prolaza zavarivanja. Posjeduje jako dobra mehanička svojstva koja su prikazana na certifikatu tvrtke koja prodaje navedeni dodatni materijal, slika 14.

AIR LIQUIDE WELDING FRANCE  
13 Rue d'Epluches, Saint-Ouen l'Aumône  
95315 Cergy Pontoise Cedex - France

Phone: +33134213333  
Fax: +33134213130

Pagina 1 di 1

### Certificato di Prodotto / Product Certificate

<b>Certificato N°:</b> Certificate n°: ALW00111394-1	<b>Ordine N°:</b> Order n°:	<b>Bolla N°:</b> Delivery Note n°:	<b>Cliente:</b> Customer: SUMMA-CHEM D.O.O. KASINCI, 1 ODVOJAK 1
<b>Data:</b> Date: 17/04/2012	<b>Quantità:</b> Quantity:	<b>UM:</b> Unit: KG	<b>10257 BREZOVICA - CROAZIA</b> CROATIA
<b>Designazione:</b> Trade name:	<b>W000283110</b> <b>INERTFIL 307 1.0X0015XBS300XP</b>		<b>Lotto N°: / Batch n°:</b> 125316604
<b>Classificazione:</b> Classification:	<b>AWS A5.9-93: ER 307 (Appr.)</b> <b>EN 14343-A: G 18 8 Mn</b>		

Si confermano le proprietà sotto riportate per i consumabili di saldatura da noi forniti  
We confirm following properties for the welding filler metals delivered by us

#### Analisi chimica prodotto / Product chemical analysis (%):

In accordo a / According to EN 10204-3.1

C	Mn	Si	P	S	Mo	Cr	Ni	Cu
0.086	7.4	0.81	0.019	0.01	0.03	18.65	9	0.03

#### Proprietà meccaniche del deposito / Weld metal mechanical properties:

In accordo a / According to EN 10204-2.2

Trattamento Termico Heat treatment	Test temp. °C	Snervamento Yield Strength Rp0.2 [N/mm²]	Trazione Tensile Strength Rm [N/mm²]	Allungamento Elongation A [%]	Durezza Hardness HB	Resilienza - Impact strength (Charpy-V)		
						Temp: °C	Joule	Media Average
Come Saldato as Welded	20	420	600	30		20		60

**Note:**  
Remarks:

Questo certificato è stato stampato da computer e non necessita di firma  
This certificate is printed by computer and needs no signature

Emesso da - issued by: Brentegani Roberto

Quality Departement - Verona Unit  
Piubello Andrea

Slika 13. Certifikat dodatnog materijala – INERTFIL 307 [24]

**OERLIKON KAYNAK ELEKTRODLARI VE SANAYİ A.Ş.**

**TEST RAPORU / TEST CERTIFICATE**  
EN 10204 B.1'e göre hazırlanmıştır. / Prepared according to EN 10204 B.1.

Sertifika No Certificate No	112421	Tarih Date	03.08.2017	Standart Standard	ASME SEC II/C/SFA-5.1B ER 706-E
Müşteri Purchaser	SUMMA-CHEM D.O.O.			Standart Standard	EN ISO 14341 - A
Ürün Adı Product Name	MG-2	Sipariş No Order No	9989	Standart Standard	G 42 4 M21 G 35H
				Onaylar Approvals	DNV&GL, RINA, D8, TÜV-ABS CWB-TL

**Kaynak Tel/Kimyasal Analizi (%)**  
Solid Wire/Chemical analysis (%)

Ürün No Lot No	Tel çapı Diameter [mm]	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Al	Zr	Ti
26702413	1.00	0.069	0.801	1.516	0.011	0.011	0.050	0.055	0.003	0.062	0.008	0.004	0.008	0.002
26702414	1.00	0.073	0.806	1.500	0.011	0.011	0.034	0.049	0.003	0.059	0.009	0.004	0.007	0.002
26703007	1.00	0.065	0.801	1.502	0.012	0.010	0.026	0.048	0.003	0.060	0.014	0.005	0.008	0.003
26702412	1.20	0.070	0.805	1.523	0.011	0.014	0.026	0.050	0.003	0.061	0.009	0.005	0.008	0.002
26703007	1.20	0.065	0.801	1.502	0.012	0.010	0.026	0.048	0.003	0.060	0.014	0.005	0.008	0.003
32607539	1.20	0.073	0.871	1.503	0.007	0.015	0.053	0.044	0.014	0.147	0.006	0.004	0.008	0.003
32607543	1.20	0.071	0.852	1.475	0.004	0.016	0.044	0.037	0.015	0.109	0.006	0.007	0.008	0.003
32607544	1.20	0.067	0.869	1.477	0.004	0.014	0.041	0.029	0.014	0.113	0.006	0.004	0.008	0.003
32607546	1.20	0.064	0.888	1.434	0.002	0.013	0.039	0.031	0.015	0.113	0.008	0.006	0.010	0.003
32608195	1.20	0.076	0.857	1.510	0.007	0.016	0.047	0.039	0.011	0.139	0.006	0.003	0.007	0.002

**Kaynak Metalinin Mekanik Özellikleri**  
All-weld-metal mechanical properties

Ürün No Lot No	Tel çapı Diameter [mm]	Miktar(Kg) Quantity(Kg)	Çekme Dayanımı Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	Akma Dayanımı Yield strength (N/mm <sup>2</sup> )	Kıvrma Uzunluğu Elongation (%)	Darbe Enerjisi Impact energy -30°C (J)
26702413	1.00	2160	530	460	28	55
26702414	1.00	1080	530	460	28	55
26703007	1.00	1080	530	460	28	55
26702412	1.20	1080	530	460	28	55
26703007	1.20	1080	530	460	28	55
32607539	1.20	3240	530	460	28	55
32607543	1.20	3240	530	460	28	55
32607544	1.20	2160	530	460	28	55
32607546	1.20	3240	530	460	28	55
32608195	1.20	3240	530	460	28	55

İş bu deney raporunda yer alan memnuniyet işleri "sipariş parçaları" ve "işleri elverişli arazi standartlara" uygunluğunu beyan etmemiştir.  
We hereby certify that the product described above "complies with the terms of the order" and "conforms with the relevant international standards."

Sertifika Hizmetleri  
Certification Services

**maweld**

\* Mechanical properties were given according to EN 10204 B.2.

Organizasyon Sistemleri 2 Katmanlı 40000 Marmara - Tuzla / TR • Phone: +90 236 2262400 • Fax: +90 236 2262406 • posta@oerlikon.com.tr

Slika 14. Certifikat dodatnog materijala – MG 2 [24]

#### 4.5. CMT postupak zavarivanja

CMT (eng. Cold Metal Transfer) postupak zavarivanja je postupak koji je razvijen kako bi se udovoljilo visokim standardima proizvodnje. Naime, zavarivanjem se unosi velika količina topline u osnovni materijal što uvelike smanjuje svojstva samog materijala. Zbog toga je razvijen CMT postupak kako mu samo ime govori postupak hladnog prijenosa materijala. Taj hladni prijenos je samo figurativan, a označava prijenos materijala uz podosta smanjen unos topline u osnovni materijal. Postupak funkcionira na principu koji je prikazan na slici 15.

Vidljivo je da u prvom koraku samog postupka se uspostavlja električni luk te motor koji dodaje žicu počinje s radom i žica dolazi sve bliže osnovnom materijalu. Nakon što je žica dovoljno blizu osnovnom materijalu i nakon što se formirala talina na kraju žice i na osnovnom materijalu, isključuje se električni luk i struja se smanjuje. U tom trenutku kraj žice s talinom udara u osnovni materijal, a motor za dodavanje žice počinje uvlačiti žicu u pištolj. Zbog te promjene smjera kretanja žice talina ostaje na osnovnom materijalu, a ostatak žice se vraća u položaj u kojem se ponovo uspostavlja električni luk i cijeli proces kreće ispočetka. Taj pomak žice naprijed natrag događa se i do 70 puta u sekundi. [26]



Slika 15. CMT postupak zavarivanja [25]

Tri su važna kriterija koja razlikuju CMT proces od standardnog zavarivanja. Kretanje žice je uključeno u proces zavarivanja (kontrolirano), unos topline je smanjen i prijenos metala je bez prskanja.

CMT postupak zavarivanja ima niz prednosti koje su direktna posljedica smanjenog unosa topline. Zbog smanjenih temperatura koje se razvijaju u električnom luku povećava se preciznost postupka, dolazi do manjih deformacija u materijalu, smanjuje se prskanje prilikom zavarivanja, te se dobe puno bolja mehanička svojstva u području zone utjecaja topline. Nedostatak je što je ograničen na tanke materijale maksimalne debljine 3 do 4 mm. [26]

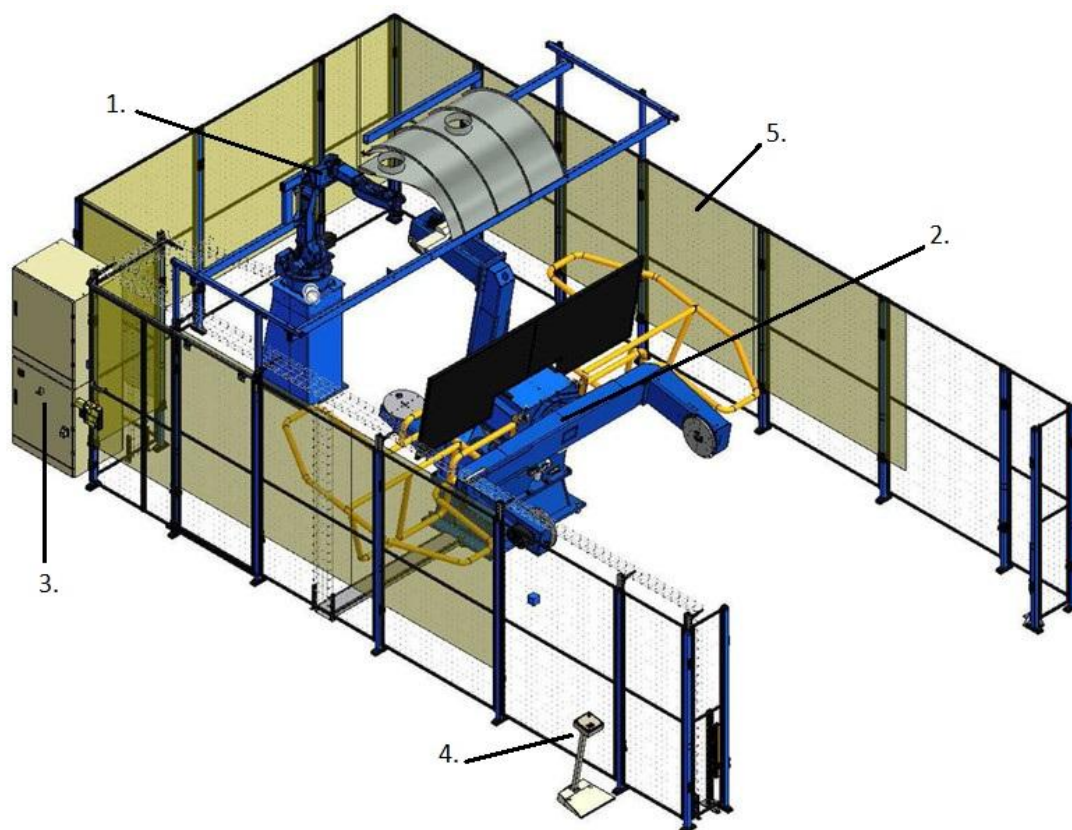
## 5. ROBOTSKA STANICA ZA ZAVARIVANJE

Robotizirano zavarivanje danas se sve češće može vidjeti u proizvodnji. Naime, kako bi proizvod bio konkurentan na tržištu mora zadovoljavati visoke standarde kvalitete uz što nižu cijenu. Zbog takvih zahtjeva za proizvodom, roboti se predstavljaju kao idealno rješenje. Naime, implementacija robota u proizvodnju predstavlja veliki trošak, ali daljnje korištenje robotske stanice smanjuje troškove proizvodnje. Roboti su nakon programiranja i pravilnog namještanja parametara sposobni raditi potpuno. Programiran robot obavlja sve zavarivačke procese samostalno i u svim

položajima skoro pa jednako kvalitetno, može raditi u više smjena jednako učinkovito te izvršavati poslove koji bi za čovjeka bili monotoni ili opasni.

### 5.1. MOTOMAN ArcSistem VMF 500 S5D

Robotska stanica za zavarivanje MOTOMAN ArcSistem VMF 500 S5D sastoji se od nekoliko glavnih dijelova. Ti dijelovi sinkronizirano funkcioniraju i omogućuju brže i produktivnije zavarivanje obradaka. Cijeli sustav je prikazan na slici 16.



Slika 16. Robotska stanica MOTOMAN ArcSistem VMF 500 S5D [24]

Robotska stanica sastoji se od pet osnovnih dijelova koji su neophodni za cijeli proces. Kako je vidljivo prema slici ti dijelovi su:

1. Robotski manipulator,
2. Pozicioner,
3. Centralno računalo i napajanje zavarivačke stanice,
4. Sigurnosni sustav,
5. Zaštitna ograda.

Svaki od nabrojenih dijelova ima određenu funkciju koja omogućava proces zavarivanja. Prvi od tih dijelova je robotski manipulator ili robotska ruka. Robotska ruka služi za prihvatanje pištolja za zavarivanje te dovođenja istog do mjesta zavarivanja. Nakon što je pištolj za zavarivanje na pravom položaju i nakon što proces zavarivanja počne robotska ruka ima zadatak voditi pištolj za zavarivanje u smjeru zavarivanja točno određenom brzinom i točno određenim nagibom koji je operater zadao. Ta mogućnost kontinuiranog zavarivanja daje visoku kvalitetu zavarenog spoja i povećanu produktivnost.

Pozicioner kao drugi nabrojeni sklop ima zadaću namještanja predmeta koji se zavaruje u položaj koji odgovara robotskoj ruci. Taj sklop cijelom sustavu daje još dodatna tri stupnja slobode koja ubrzavaju proces i omogućuju zavarivanje dijelova razolikih oblika. Pozicioner ujedno ima zadaću ubrzavanja procesa na još jedan način. Na slici je vidljivo kako se pozicioner sastoji od dva dijela koja se mogu zakretati neovisno jedan o drugome. To svojstvo omogućava istovremeno zavarivanje i montiranje sljedećeg dijela. Naime dok se na jednoj strani dio zavaruje na drugoj strani operater može staviti novi obradak na mjesto i učvrstiti ga te tako smanjiti vrijeme stajanja između izmjene obradaka.

Centralno računalo i napajanje zavarivačke stanice ima glavnu funkciju u cijelom sustavu. Ono je zaduženo da cijeli sustav bude sinkroniziran, da upravlja radom pojedinih dijelova sustava te da osigura potrebnu električnu energiju za pojedini dio u točno određenom trenutku.

Sigurnosni sustav je sustav niza senzora koji omogućuju sigurno zavarivanje i koji štite operatera od slučajnog ulaska u radni prostor robota gdje bi se mogle dogoditi ozljede. Također štiti robotsku ruku i pozicioner od predmeta koji bi se igrom slučaja mogli naći u radnom prostoru i prouzročiti kvar cijelog sustava.

Zaštitna ograda je niz pregrada koje okružuju zavarivačku stanicu te na taj način osiguravaju i označavaju radni prostor koji je potreban za nesmetano funkcioniranje sustava. Još je jedna bitna zadaća zaštitne ograde, a to je da štiti radnike koji bi se mogli naći u blizini od štetnih ultraljubičastih zraka koje se emitiraju prilikom zavarivanja, te od štrcanja dodatnog materijala prilikom samog zavarivanja. [27]

Na slici 16. i 17. prikazana je zavarivačka stanica MOTOMAN u realnim uvjetima te s dodatnom opremom koja je potrebna za proces zavarivanja, koja se nalazi u Đuri Đakoviću , Specijalna vozila d.d., Slavonski Brod.





*Slika 16. Zavarivačka stanica*

Na slici 18. vidljiv je drugi dio radnog prostora s robotskom rukom, pozicionerom i zavarivačkom stanicom. Stanice za zavarivanje ne spadaju u osnovne dijelove sustava jer svaku od tih stanica odabire i instalira krajnji korisnik prema svojim potrebama. U ovom prostoru se nalaze dvije zavarivačke stanice zbog toga jer se na ovom sustavu vrši zavarivanje aluminijskih legura i visokolegiranih čelika pa je svaka od tih stanica namještena za zavarivanje određene vrste materijala.



*Slika 17. Robotska ruka, pozicioner i izvor struje za zavarivanje*

## **5.2. Uređaj za zavarivanje**

Kod zavarivanja ispitnih uzoraka korišten je u sklopu robotske stanice uređaj tvrtke Fronius, TransPuls Synergic 4000 CMT R. To je inverterski uređaj za impulsno i klasično MIG/MAG zavarivanje. Osim MIG/MAG zavarivanja moguć je još niz postupaka koji se mogu primijeniti pomoću tog uređaja poput REL zavarivanja, žljebljenja i dr. Područje zavarivanja mu je od 3 do 400 A, uz napon od 14,2 do 34V. Intermitencija uređaja iznosi 50% na 400A, 60% na 365A i 100% na 320A. Izgled uređaja prikazan je na slici 18.



Slika 18. Izvor struje za zavarivanje Synergic 4000 CMT R



## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

U ekperimentalnom dijelu provedeno je zavarivanje uzoraka uz optimizaciju parametara kako bi se postigla što veća produktivnost uz zadovoljavanje svih svojstava. Korišteni osnovni materijal je ARMOX 440T, debljine 8 mm. Ovaj čelik spada u grupu oklopnih čelika velike tvrdoće, OČVT, čiji su kemijski sastav, mikrostruktura i svojstva obrađeni u teorijskom dijelu.

Predobrada osnovnog materijala i zavarivanje ispitnih uzoraka provedeno je na robotskoj zavarivačkoj stanici u Đuri Đakoviću, Specijalna vozila d.d., Slavonski Brod. Nerazorna i razorna ispitivanja provedena su na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

### 6.1. Predobrada uzoraka

Prije početka zavarivanja potrebno je ploče osnovnog materijala pripremiti za zavarivanje. Predpriprema je izvršena u Specijalnim vozilima u Slavonskom Brodu. Pomoću laserskog uređaja TruLaser 3060 obavljeno je izrezivanje testnih ploča dimenzija 500 x 150 mm. Laserski uređaj koristi se za rezanje nekoliko vrsta materijala kao obični čelik debljine do 20 mm, a nehrđajući čelik i aluminijske legure do 15 mm. Uređaj kojim su se rezale ploče prikazan je na slici 19.



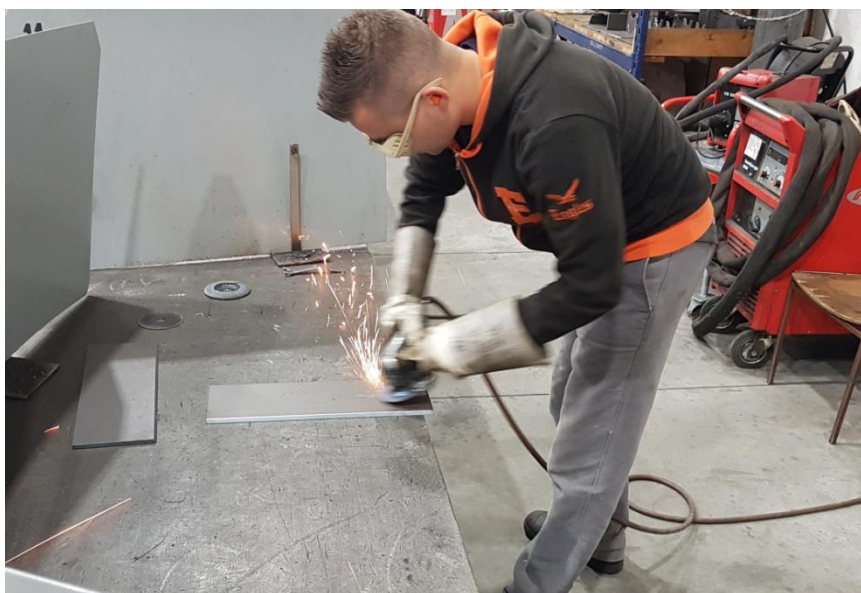
*Slika 19. Laserski uređaj TruLaser 3060*

Nakon izrezivanja ploča izvršena je predobrada kosina na pločama kako bi bilo moguće zavarivanje istih. Ploče koje su pripremljene za sučeoni spoj obrađene su glodanjem pod kutem od 30°. Predobrada je izvršena pomoću portalne glodalice Forest-Line koja je prikazana na slici 20.



*Slika 20. Portalna glodalica Forest-Line*

Nakon predobrade, površinu ploča je potrebno očistiti od nečistoća, masti i dr. To se izvodi s ručnom pneumatskom brusilicom na kojoj se nalazi brusna ploča. Taj postupak prikazan je na slici 21.



*Slika 21. Postupak čišćenja ploča*

## **6.2. Zavarivanje uzoraka**

Prije zavarivanja, obrađene ploče je potrebno međusobno spojiti i učvrstiti u stezne naprave koje se nalaze na pozicioneru. Izgled spojenih i stegnutih ploča prije samog zavarivanja prikazan je na slici 22. Sučeoni i kutni spojevi pripoje se na početku te se zatim stegnu u naprave. Nakon što je sve pripremljeno kreće se s programiranjem robota te se vrši zavarivanje ploča. Na slici 22. također je prikazano i programiranje robota.

### **6.2.1. Dodatni materijal**

Za provedbu pokusa korištena su dva dodatna materijala, OERLIKON Interfil 307 i OERLIKON MG2, koji su opisani u poglavlju 4.4.3. Dodatni materijal je u obliku žice promjera 1,0 mm i potrebna je zaštitna atmosfera koja je obrađena u poglavlju 4.4.2. i naznačena kroz WPS.

### **6.2.2. Tijek zavarivanja**

Izvršeno je zavarivanje devet uzoraka, od kojih su sedam kutnih (jednostrani zavar) i 2 sučeona. Jedan sučeoni zavar izveden je na robotskoj stanici, dok je drugi izveden ručno. Slike zavarenih uzoraka nalaze se u tablici 8. Proces zavarivanja uzoraka prikazan je na slici 23.

Za svaki od uzoraka izrađena je Uputa za zavarivanje ili WPS (eng. Welding Procedure Specification) kako bi se znali parametri i uvjeti zavarivanja. WPS sadrži sve podatke koji su značajni kod zavarivanja i osnovna je dokumentacija u tvrtkama kada je u pitanju zavareni spoj. WPS izrađuje inženjer koji je zadužen za proces zavarivanja i svojim potpisom odgovara za taj zavareni spoj. Bitan značaj WPS-a je u tome da sadrži sve bitne značajke postupka pa je zbog toga olakšano razumijevanje cijelog postupka osobama koje nakon zavarivanja ispituju zavareni spoj. Redoslijed, parametri i uvjeti zavarivanja za svaki uzorak prikazani su u Uputama za zavarivanje ili WPS obrascima, koji se nalaze na stranicama 50 do 58 ovog rada.








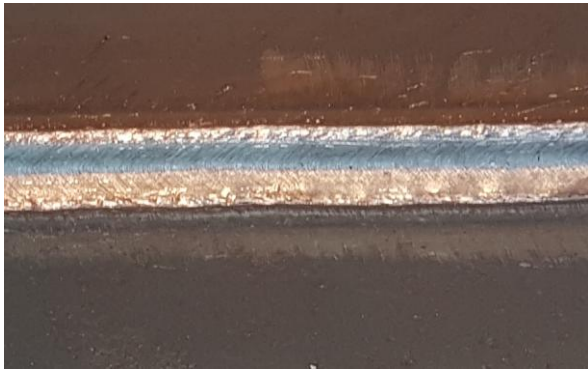
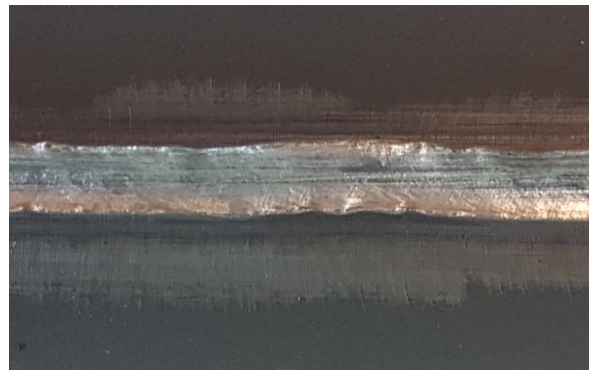

*Slika 22. Programiranje robota za zavarivanje*




*Slika 23. Zavarivanje kutnog uzorka*


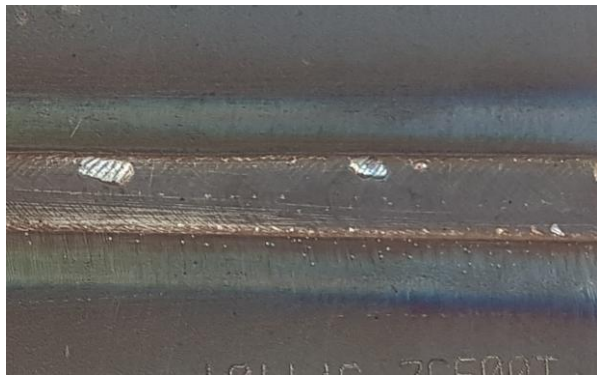
U tablici 8. uzorci su numerirani prema redoslijedu zavarivanja te su slikama prikazani kutni spojevi, a u tablici 9. prikazane su dvije strane zavarenog spoja, lice i korjen sučeonog spoja.

Tablica 8. Zavareni spojevi - kutni

	
Uzorak 1	Uzorak 2
	
Uzorak 3	Uzorak 4
	
Uzorak 5	Uzorak 6

	
Uzorak 7	

Tablica 9. Zavareni spojevi – sučeoni


Lice zavarenog spoja	Lice zavarenog spoja
	
Uzorak 8	Uzorak 9

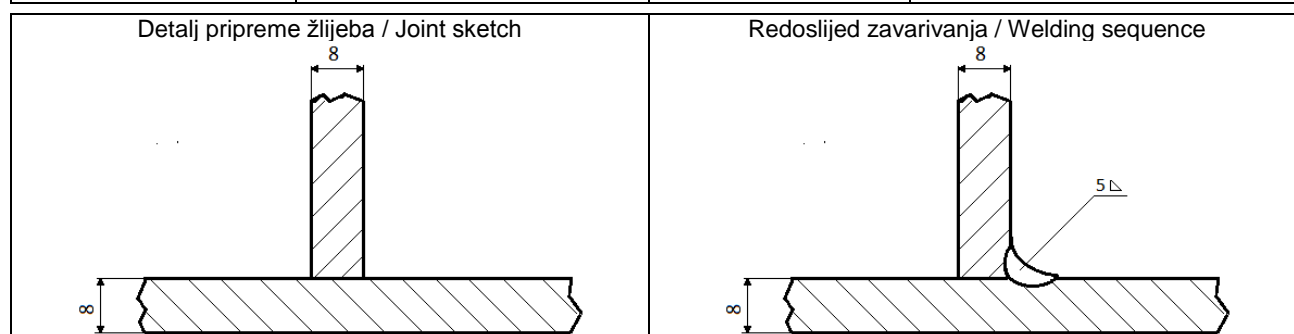


# **UPUTA ZA ZAVARIVANJE** **WELDING PROCEDURE SPECIFICATION** **(WPS)**

Reg.ozn.dok. /  
Doc.Reg.No.

**01-ROB-AX-1**

Objekt Object	DIPLOMSKI-UZORAK 1	Crtež broj Supporting drawing No.		/	
Postupak zavarivanja Welding procedure	MAG (135)	Osnovni materijal / Base metal			
Broj pripadajućeg atesta Supporting WPAR No.	/	Oznaka Mark	Grupa Group	Dimenzija / debljina Dimension / Thickness	
Ime zavarivača Welder's name	ĐĐSV	ARMOX 440T		/	8 mm
Tip procesa Welding process type	AUTOMATIZIRAN-ROBOTIZIRAN	Simbol vrste spoja Sign of joint design	5 	Položaj zavarivanja Welding position	PB
Vrsta spoja Joining type	FW-KUTNI	Način žljebljenja Gouging		/	



## Parametri zavarivanja / Welding parameters

Sloj broj Pass No.	Proces zav. Welding proces	Promjer DM size FM (mm)	Jakost struje Current (A)	Napon Voltage (V)	Vrsta i polaritet Type / polarity	Protok plina Gas flow rate (l/min)	Brzina zav. Travel speed (cm/min)	Brzina žice Wire speed (cm/min)	Unos topline Heat input (KJ/cm)
1	135 (MAG-P)	1,0	245	25-30	DC+	12-14	40	/	8,085

Dodatni i pomoćni materijal Filler and auxillaries metal		Temperatura predgrijavanja Preheat temperature	20	°C
Naziv i proizvođač Designation and manufacturer	MG-2, OERLIKON	Međuslojna temperatura Interpass temaprature	180	°C
Klasifikacija Clasification	EN 14341-A: G 3Si1	Toplinska obrada Heat treatment	Da / Yes G	/
Tip obloge Coat type	/		Ne / No G	/
Sastav praška Flux composition	/	Tehnika rada Welding technique	Ravno / String	DA
			Nijhanje / Wave bead	NE
Promjer i vrsta W-žice Size and type W-wire	/	Max. širina gusjenice Max. layer width	/	mm
Sušenje DM To dry FM	/	Početno i međuslojno čišćenje Cleaning initial and interpass	POČETNO ČIŠĆENJE	
Zaštitni plin / zaštita korijena Shielding gas / Backing gas	EN 14175 M21 82%Ar+18%CO2	Ostalo Other	/	
Napomena / Comment: KORIŠTENA PULSNA STRUJA			Standard / Norma EN ISO 9606-1/EN 15614-1	
Izdanje / Edition	Izradio/Prepared by MARO JAGNJIĆ dipl.ing.IWE	Odobrio / Ratify		
	Datum / Date: 17.05.2018.	Datum / Date:		





# **UPUTA ZA ZAVARIVANJE** **WELDING PROCEDURE SPECIFICATION** **(WPS)**

Reg.ozn.dok. /  
Doc.Reg.No.

**01-ROB-AX-2**

Objekt Object	DIPLOMSKI-UZORAK 2	Crtež broj Supporting drawing No.		/	
Postupak zavarivanja Welding procedure	MAG (135)	Osnovni materijal / Base metal			
Broj pripadajućeg atesta Supporting WPAR No.	/	Oznaka Mark	Grupa Group	Dimenzija / debljina Dimension / Thickness	
Ime zavarivača Welder's name	ĐĐSV	ARMOX 440T		/	8 mm
Tip procesa Welding process type	AUTOMATIZIRAN-ROBOTIZIRAN	Simbol vrste spoja Sign of joint design	4 	Položaj zavarivanja Welding position	PB
Vrsta spoja Joining type	FW-KUTNI	Način žljebljenja Gouging		/	

<p style="text-align: center;">Detalj pripreme žlijeba / Joint sketch</p>	<p style="text-align: center;">Redoslijed zavarivanja / Welding sequence</p>
---	--

## Parametri zavarivanja / Welding parameters

Sloj broj Pass No.	Proces zav. Welding proces	Promjer DM size FM (mm)	Jakost struje Current (A)	Napon Voltage (V)	Vrsta i polaritet Type / polarity	Protok plina Gas flow rate (l/min)	Brzina zav. Travel speed (cm/min)	Brzina žice Wire speed (cm/min)	Unos topline Heat input (KJ/cm)
1	135 (MAG-P)	1,0	280	25-30	DC+	12-14	50	/	7,39

Dodatni i pomoćni materijal Filler and auxillaries metal		Temperatura predgrijavanja Preheat temperature	20	°C
Naziv i proizvođač Designation and manufacturer	MG-2, OERLIKON	Međuslojna temperatura Interpass temapature	180	°C
Klasifikacija Clasification	EN 14341-A: G 3Si1	Toplinska obrada Heat treatment	Da / Yes G	/
Tip obloge Coat type	/		Ne / No G	/
Sastav praška Flux composition	/	Tehnika rada Welding technique	Ravno / String	DA
			Nijhanje / Wave bead	NE
Promjer i vrsta W-žice Size and type W-wire	/	Max. širina gusjenice Max. layer width	/	mm
Sušenje DM To dry FM	/	Početno i međuslojno čišćenje Cleaning initial and interpass	POČETNO ČIŠĆENJE	
Zaštitni plin / zaštita korijena Shielding gas / Backing gas	EN 14175 M21 82%Ar+18%CO <sub>2</sub>	Ostalo Other	/	
Napomena / Comment: KORIŠTENA PULSNA STRUJA			Standard / Norma EN ISO 9606-1/EN 15614-1	
Izdanje / Edition	Izradio/Prepared by	MARO JAGNJIĆ dipl.ing.IWE	Odobrio / Ratify	
	Datum / Date:	17.05.2018.	Datum / Date:	





# **UPUTA ZA ZAVARIVANJE** **WELDING PROCEDURE SPECIFICATION** **(WPS)**

Reg.ozn.dok. /  
Doc.Reg.No.

**01-ROB-AX-3**

Objekt Object	DIPLOMSKI-UZORAK 3	Crtež broj Supporting drawing No.		/	
Postupak zavarivanja Welding procedure	MAG (135)	Osnovni materijal / Base metal			
Broj pripadajućeg atesta Supporting WPAR No.	/	Oznaka Mark	Grupa Group	Dimenzija / debljina Dimension / Thickness	
Ime zavarivača Welder's name	ĐĐSV	ARMOX 440T	/	8 mm	
Tip procesa Welding process type	AUTOMATIZIRAN-ROBOTIZIRAN	Simbol vrste spoja Sign of joint design	4	Položaj zavarivanja Welding position	PB
Vrsta spoja Joining type	FW-KUTNI	Način žljebljenja Gouging		/	

<p style="text-align: center;">Detalj pripreme žlijeba / Joint sketch</p>	<p style="text-align: center;">Redoslijed zavarivanja / Welding sequence</p>
---	--

## Parametri zavarivanja / Welding parameters

Sloj broj Pass No.	Proces zav. Welding proces	Promjer DM size FM (mm)	Jakost struje Current (A)	Napon Voltage (V)	Vrsta i polaritet Type / polarity	Protok plina Gas flow rate (l/min)	Brzina zav. Travel speed (cm/min)	Brzina žice Wire speed (cm/min)	Unos topline Heat input (KJ/cm)
1	135 (MAG-P)	1,0	300	25-30	DC+	12-14	60	/	6,6

Dodatni i pomoćni materijal Filler and auxillaries metal		Temperatura predgrijavanja Preheat temperature		20	°C
Naziv i proizvođač Designation and manufacturer	MG-2, OERLIKON	Međuslojna temperatura Interpass temapature		180	°C
Klasifikacija Clasification	EN 14341-A: G 3Si1	Toplinska obrada Heat treatment		Da / Yes G	/
Tip obloge Coat type	/			Ne / No G	/
Sastav praška Flux composition	/	Tehnika rada Welding technique		Ravno / String	DA
				Nijhanje / Wave bead	NE
Promjer i vrsta W-žice Size and type W-wire	/	Max. širina gusjenice Max. layer width		/	mm
Sušenje DM To dry FM	/	Početno i međuslojno čišćenje Cleaning initial and interpass		POČETNO ČIŠĆENJE	
Zaštitni plin / zaštita korijena Shielding gas / Backing gas	EN 14175 M21 82%Ar+18%CO <sub>2</sub>	Ostalo Other	/		
Napomena / Comment: KORIŠTEN PULSNA STRUJA			Standard / Norma EN ISO 9606-1/EN 15614-1		
Izdanje / Edition	Izradio/Prepared by	MARO JAGNJIĆ dipl.ing.IWE		Odobrio / Ratify	
	Datum / Date:	17.05.2018.		Datum / Date:	



# **UPUTA ZA ZAVARIVANJE** **WELDING PROCEDURE SPECIFICATION** **(WPS)**

Reg.ozn.dok. /  
Doc.Reg.No.

**01-ROB-AX-4**

Objekt Object	DIPLOMSKI-UZORAK 4	Crtež broj Supporting drawing No.		/	
Postupak zavarivanja Welding procedure	MAG (135)	Osnovni materijal / Base metal			
Broj pripadajućeg atesta Supporting WPAR No.	/	Oznaka Mark	Grupa Group	Dimenzija / debljina Dimension / Thickness	
Ime zavarivača Welder's name	ĐĐSV	ARMOX 440T		/	8 mm
Tip procesa Welding process type	AUTOMATIZIRAN- ROBOTIZIRAN	Simbol vrste spoja Sign of joint design	5	Položaj zavarivanja Welding position	PB
Vrsta spoja Joining type	FW-KUTNI	Način žljebljenja Gouging		/	

<p style="text-align: center;">Detalj pripreme žlijeba / Joint sketch</p>	<p style="text-align: center;">Redoslijed zavarivanja / Welding sequence</p>
---	--

## Parametri zavarivanja / Welding parameters

Sloj broj Pass No.	Proces zav. Welding proces	Promjer DM size FM (mm)	Jakost struje Current (A)	Napon Voltage (V)	Vrsta i polaritet Type / polarity	Protok plina Gas flow rate (l/min)	Brzina zav. Travel speed (cm/min)	Brzina žice Wire speed (cm/min)	Unos topline Heat input (KJ/cm)
1	135 (MAG-CMT)	1,0	180	18-24	DC+	12-14	30	/	6,05


Dodatni i pomoćni materijal Filler and auxillaries metal		Temperatura predgrijavanja Preheat temperature	20	°C
Naziv i proizvođač Designation and manufacturer	MG-2, OERLIKON	Međuslojna temperatura Interpass temaprature	180	°C
Klasifikacija Clasification	EN 14341-A: G 3Si1	Toplinska obrada Heat treatment	Da / Yes G	/
Tip obloge Coat type	/		Ne / No G	/
Sastav praška Flux composition	/	Tehnika rada Welding technique	Ravno / String	DA
			Nijhanje / Wave bead	NE
Promjer i vrsta W-žice Size and type W-wire	/	Max. širina gusjenice Max. layer width	/	mm
Sušenje DM To dry FM	/	Početno i međuslojno čišćenje Cleaning initial and interpass	POČETNO ČIŠĆENJE	
Zaštitni plin / zaštita korijena Shielding gas / Backing gas	EN 14175 M21 82%Ar+18%CO2	Ostalo Other	/	
Napomena / Comment: KORIŠTEN CMT			Standard / Norma EN ISO 9606-1/EN 15614-1	
Izdanje / Edition	Izradio/Prepared by MARO JAGNJIĆ dipl.ing.IWE	Odobrio / Ratify		
	Datum / Date: 17.05.2018.	Datum / Date:		

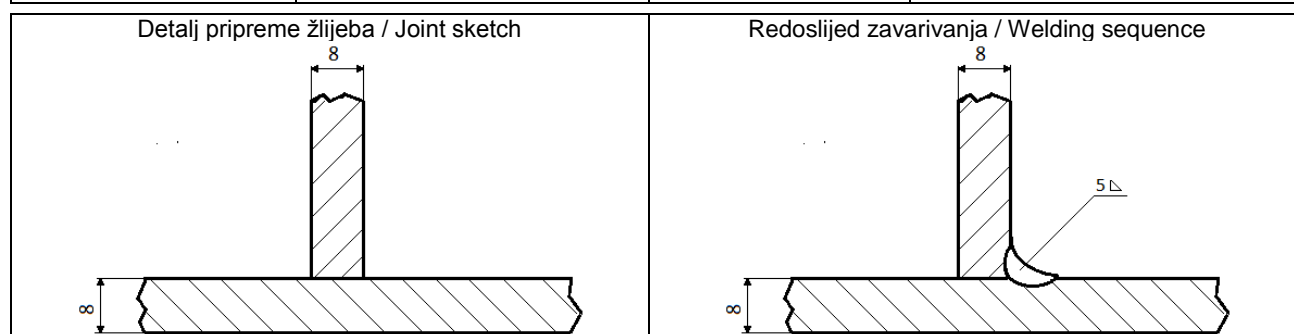


# **UPUTA ZA ZAVARIVANJE** **WELDING PROCEDURE SPECIFICATION** **(WPS)**

Reg.ozn.dok. /  
Doc.Reg.No.

**01-ROB-AX-5**

Objekt Object	DIPLOMSKI-UZORAK 5	Crtež broj Supporting drawing No.		/	
Postupak zavarivanja Welding procedure	MAG (135)	Osnovni materijal / Base metal			
		Oznaka Mark	Grupa Group	Dimenzija / debljina Dimension / Thickness	
	Broj pripadajućeg atesta Supporting WPAR No.	/			
Ime zavarivača Welder's name	ĐĐSV	ARMOX 440T		/	8 mm
Tip procesa Welding process type	AUTOMATIZIRAN- ROBOTIZIRAN	Simbol vrste spoja Sign of joint design	5 	Položaj zavarivanja Welding position	PB
Vrsta spoja Joining type	FW-KUTNI	Način žljebljenja Gouging		/	



## Parametri zavarivanja / Welding parameters

Sloj broj Pass No.	Proces zav. Welding proces	Promjer DM size FM (mm)	Jakost struje Current (A)	Napon Voltage (V)	Vrsta i polaritet Type / polarity	Protok plina Gas flow rate (l/min)	Brzina zav. Travel speed (cm/min)	Brzina žice Wire speed (cm/min)	Unos topline Heat input (KJ/cm)
1	135 (MAG-P)	1,0	280	25-29	DC+	12-14	50	/	7,26

Dodatni i pomoćni materijal Filler and auxillaries metal		Temperatura predgrijavanja Preheat temperature	20	°C
Naziv i proizvođač Designation and manufacturer	Interfil 307, OERLIKON	Međuslojna temperatura Interpass temaprature	180	°C
Klasifikacija Clasification	EN 14343-A: G 18 8 Mn	Toplinska obrada Heat treatment	Da / Yes G	/
Tip obloge Coat type			Ne / No G	/
Sastav praška Flux composition	/	Tehnika rada Welding technique	Ravno / String	DA
			Nijhanje / Wave bead	NE
Promjer i vrsta W-žice Size and type W-wire	/	Max. širina gusjenice Max. layer width	/	mm
Sušenje DM To dry FM	/	Početno i međuslojno čišćenje Cleaning initial and interpass	POČETNO ČIŠĆENJE	
Zaštitni plin / zaštita korijena Shielding gas / Backing gas	HRN ISO 14175 M12 97,5%Ar+2,5%CO <sub>2</sub>	Ostalo Other	/	
Napomena / Comment: KORIŠTENA PULSNA STRUJA			Standard / Norma EN ISO 9606-1/EN 15614-1	
Izdanje / Edition	Izradio/Prepared by MARO JAGNJIĆ dipl.ing.IWE	Odobrio / Ratify		
	Datum / Date: 17.05.2018.	Datum / Date:		



# **UPUTA ZA ZAVARIVANJE** **WELDING PROCEDURE SPECIFICATION** **(WPS)**

Reg.ozn.dok. /  
Doc.Reg.No.

**01-ROB-AX-6**

Objekt Object	DIPLOMSKI-UZORAK 6	Crtež broj Supporting drawing No.		/	
Postupak zavarivanja Welding procedure	MAG (135)	Osnovni materijal / Base metal			
Broj pripadajućeg atesta Supporting WPAR No.	/	Oznaka Mark	Grupa Group	Dimenzija / debljina Dimension / Thickness	
Ime zavarivača Welder's name	ĐĐSV	ARMOX 440T		/	8 mm
Tip procesa Welding process type	AUTOMATIZIRAN-ROBOTIZIRAN	Simbol vrste spoja Sign of joint design	5	Položaj zavarivanja Welding position	PB
Vrsta spoja Joining type	FW-KUTNI	Način žljebljenja Gouging		/	

<p style="text-align: center;">Detalj pripreme žlijeba / Joint sketch</p>	<p style="text-align: center;">Redoslijed zavarivanja / Welding sequence</p>
---	--

## Parametri zavarivanja / Welding parameters

Sloj broj Pass No.	Proces zav. Welding proces	Promjer DM size FM (mm)	Jakost struje Current (A)	Napon Voltage (V)	Vrsta i polaritet Type / polarity	Protok plina Gas flow rate (l/min)	Brzina zav. Travel speed (cm/min)	Brzina žice Wire speed (cm/min)	Unos topline Heat input (KJ/cm)
1	135 (MAG-P)	1,0	320	27-31	DC+	12-14	60	/	7,42

Dodatni i pomoćni materijal Filler and auxillaries metal		Temperatura predgrijavanja Preheat temperature	20	°C
Naziv i proizvođač Designation and manufacturer	Interfil 307, OERLIKON	Međuslojna temperatura Interpass temaprature	180	°C
Klasifikacija Clasification	EN 14343-A: G 18 8 Mn	Toplinska obrada Heat treatment	Da / Yes G	/
Tip obloge Coat type	/		Ne / No G	/
Sastav praška Flux composition	/	Tehnika rada Welding technique	Ravno / String	DA
			Nijhanje / Wave bead	NE
Promjer i vrsta W-žice Size and type W-wire	/	Max. širina gusjenice Max. layer width	/	mm
Sušenje DM To dry FM	/	Početno i međuslojno čišćenje Cleaning initial and interpass	POČETNO ČIŠĆENJE	
Zaštitni plin / zaštita korijena Shielding gas / Backing gas	HRN ISO 14175 M12 97,5%Ar+2,5%CO <sub>2</sub>	Ostalo Other	/	
Napomena / Comment: KORIŠTENA PULSNA STRUJA			Standard / Norma EN ISO 9606-1/EN 15614-1	
Izdanje / Edition	Izradio/Prepared by MARO JAGNJIĆ dipl.ing.IWE	Odobrio / Ratify		
	Datum / Date: 17.05.2018.	Datum / Date:		



# **UPUTA ZA ZAVARIVANJE** **WELDING PROCEDURE SPECIFICATION** **(WPS)**

Reg.ozn.dok. /  
Doc.Reg.No.

**01-ROB-AX-7**

Objekt Object	DIPLOMSKI-UZORAK 7	Crtež broj Supporting drawing No.		/	
Postupak zavarivanja Welding procedure	MAG (135)	Osnovni materijal / Base metal			
Broj pripadajućeg atesta Supporting WPAR No.	/	Oznaka Mark	Grupa Group	Dimenzija / debljina Dimension / Thickness	
Ime zavarivača Welder's name	ĐĐSV	ARMOX 440T		/	8 mm
Tip procesa Welding process type	AUTOMATIZIRAN-ROBOTIZIRAN	Simbol vrste spoja Sign of joint design	5	Položaj zavarivanja Welding position	PB
Vrsta spoja Joining type	FW-KUTNI	Način žljebljenja Gouging		/	

<p style="text-align: center;">Detalj pripreme žlijeba / Joint sketch</p>	<p style="text-align: center;">Redoslijed zavarivanja / Welding sequence</p>
---	--

## Parametri zavarivanja / Welding parameters

Sloj broj Pass No.	Proces zav. Welding proces	Promjer DM size FM (mm)	Jakost struje Current (A)	Napon Voltage (V)	Vrsta i polaritet Type / polarity	Protok plina Gas flow rate (l/min)	Brzina zav. Travel speed (cm/min)	Brzina žice Wire speed (cm/min)	Unos topline Heat input (KJ/cm)
1	135 (MAG-P)	1,0	260	24-28	DC+	12-14	40	/	8,11

Dodatni i pomoćni materijal Filler and auxillaries metal		Temperatura predgrijavanja Preheat temperature	20	°C
Naziv i proizvođač Designation and manufacturer	Interfil 307, OERLIKON	Međuslojna temperatura Interpass temaprature	180	°C
Klasifikacija Clasification	EN 14343-A: G 18 8 Mn	Toplinska obrada Heat treatment	Da / Yes G	/
Tip obloge Coat type			Ne / No G	/
Sastav praška Flux composition	/	Tehnika rada Welding technique	Ravno / String	DA
			Nijhanje / Wave bead	NE
Promjer i vrsta W-žice Size and type W-wire	/	Max. širina gusjenice Max. layer width	/	mm
Sušenje DM To dry FM	/	Početno i međuslojno čišćenje Cleaning initial and interpass	POČETNO ČIŠĆENJE	
Zaštitni plin / zaštita korijena Shielding gas / Backing gas	HRN ISO 14175 M12 97,5%Ar+2,5%CO <sub>2</sub>	Ostalo Other	/	
Napomena / Comment: KORIŠTENA PULSNA STRUJA			Standard / Norma EN ISO 9606-1/EN 15614-1	
Izdanje / Edition	Izradio/Prepared by MARO JAGNJIĆ dipl.ing.IWE	Odobrio / Ratify		
	Datum / Date: 17.05.2018.	Datum / Date:		



# **UPUTA ZA ZAVARIVANJE** **WELDING PROCEDURE SPECIFICATION** **(WPS)**

Reg.ozn.dok. /  
Doc.Reg.No.

**01-ROB-AX-8**

Objekt Object	DIPLOMSKI-UZORAK 8	Crtež broj Supporting drawing No.		/	
Postupak zavarivanja Welding procedure	MAG (135)	Osnovni materijal / Base metal			
		Oznaka Mark	Grupa Group	Dimenzija / debljina Dimension / Thickness	
	Broj pripadajućeg atesta Supporting WPAR No.	/	ARMOX 440T		/
Ime zavarivača Welder's name	ĐĐSV				
Tip procesa Welding process type	RUČNO	Simbol vrste spoja Sign of joint design		Položaj zavarivanja Welding position	PA
Vrsta spoja Joining type	BW-SUČEONI	Način žljebljenja Gouging		/	

<p style="text-align: center;">Detalj pripreme žlijeba / Joint sketch</p>	<p style="text-align: center;">Redoslijed zavarivanja / Welding sequence</p>
---	--

## Parametri zavarivanja / Welding parameters

Sloj broj Pass No.	Proces zav. Welding proces	Promjer DM size FM (mm)	Jakost struje Current (A)	Napon Voltage (V)	Vrsta i polaritet Type / polarity	Protok plina Gas flow rate (l/min)	Brzina zav. Travel speed (cm/min)	Brzina žice Wire speed (cm/min)	Unos topline Heat input (KJ/cm)
1	135 (MAG-P)	1,0	120	12-14	DC+	12-14	20	/	3,74
2	135 (MAG-P)	1,0	240	23-25	DC+	12-14	25-30	/	9,22

Dodatni i pomoćni materijal Filler and auxillaries metal		Temperatura predgrijavanja Preheat temperature	20	°C
Naziv i proizvođač Designation and manufacturer	Interfil 307, OERLIKON	Međuslojna temperatura Interpass temaprature	180	°C
Klasifikacija Clasification	EN 14343-A: G 18 8 Mn	Toplinska obrada Heat treatment	Da / Yes G	/
Tip obloge Coat type	/		Ne / No G	/
Sastav praška Flux composition	/	Tehnika rada Welding technique	Ravno / String	NE
			Nijhanje / Wave bead	DA
Promjer i vrsta W-žice Size and type W-wire	/	Max. širina gusjenice Max. layer width	/	mm
Sušenje DM To dry FM	/	Početno i međuslojno čišćenje Cleaning initial and interpass	POČETNO ČIŠĆENJE	
Zaštitni plin / zaštita korijena Shielding gas / Backing gas	HRN ISO 14175 - M12 - ArC - 2,5	Ostalo Other	/	
Napomena / Comment: KORIŠTENA PULSNA STRUJA			Standard / Norma EN ISO 9606-1/EN 15614-1	
Izdanje / Edition	Izradio/Prepared by MARO JAGNJIĆ dipl.ing.IWE	Odobrio / Ratify		
	Datum / Date: 17.05.2018.	Datum / Date:		



# **UPUTA ZA ZAVARIVANJE** **WELDING PROCEDURE SPECIFICATION** **(WPS)**

Reg.ozn.dok. /  
Doc.Reg.No.

**01-ROB-AX-9**

Objekt Object	DIPLOMSKI-UZORAK 9	Crtež broj Supporting drawing No.	/			
Postupak zavarivanja Welding procedure	MAG (135)	Osnovni materijal / Base metal				
		Oznaka Mark	Grupa Group	Dimenzija / debljina Dimension / Thickness		
	Broj pripadajućeg atesta Supporting WPAR No.	/	ARMOX 440T		/	8 mm
Ime zavarivača Welder's name	ĐĐSV					
Tip procesa Welding process type	AUTOMATIZIRAN- ROBOTIZIRAN	Simbol vrste spoja Sign of joint design		Položaj zavarivanja Welding position		PA
Vrsta spoja Joining type	BW-SUČEONI	Način žljebljenja Gouging		/		

<p style="text-align: center;">Detalj pripreme žlijeba / Joint sketch</p>	<p style="text-align: center;">Redoslijed zavarivanja / Welding sequence</p>
---	--

## Parametri zavarivanja / Welding parameters

Sloj broj Pass No.	Proces zav. Welding proces	Promjer DM size FM (mm)	Jakost struje Current (A)	Napon Voltage (V)	Vrsta i polaritet Type / polarity	Protok plina Gas flow rate (l/min)	Brzina zav. Travel speed (cm/min)	Brzina žice Wire speed (cm/min)	Unos topline Heat input (KJ/cm)
1	135 (MAG-P)	1,0	112	18-21	DC+	12-14	25	/	4,08
2	135 (MAG-P)	1,0	200	22-24	DC+	12-14	50	/	4,42

Dodatni i pomoćni materijal Filler and auxillaries metal		Temperatura predgrijavanja Preheat temperature	20	°C
Naziv i proizvođač Designation and manufacturer	Interfil 307, OERLIKON	Međuslojna temperatura Interpass temaprature	90	°C
Klasifikacija Clasification	EN 14343-A: G 18 8 Mn	Toplinska obrada Heat treatment	Da / Yes G	/
Tip obloge Coat type	/		Ne / No G	/
Sastav praška Flux composition	/	Tehnika rada Welding technique	Ravno / String	NE
			Nijhanje / Wave bead	DA
Promjer i vrsta W-žice Size and type W-wire	/	Max. širina gusjenice Max. layer width	/	mm
Sušenje DM To dry FM	/	Početno i međuslojno čišćenje Cleaning initial and interpass	POČETNO ČIŠĆENJE	
Zaštitni plin / zaštita korijena Shielding gas / Backing gas	HRN ISO 14175 - M12 - ArC - 2,5	Ostalo Other	/	
Napomena / Comment: KORIŠTENA PULSNA STRUJA			Standard / Norma EN ISO 9606-1/EN 15614-1	
Izdanje / Edition	Izradio/Prepared by	MARO JAGNJIĆ dipl.ing.IWE	Odobrio / Ratify	
	Datum / Date:	17.05.2018.	Datum / Date:	

### 6.3. Nerazorna ispitivanja

Metode nerazornih ispitivanja koje se još nazivaju defektoskopija i kontrola bez razaranja, su vrlo značajne metode za praćenje kvalitete u proizvodnji i posebno tijekom eksploatacije u svrhu pronalaženja nepravilnosti nastalih uslijed tehnoloških ili eksploatacijskih uvjeta. Prema zahtjevima nad zavarenim spojevima se provode različita ispitivanja koja pokazuju kako se ponašaju uzorci u ispitnim uvjetima. Da bi uzorci zadovoljili, te da bi se znalo stanje uzoraka prije razornih ispitivanja potrebno je provesti nerazorne metode ispitivanja uzoraka te pomoću njih otkriti moguće nedostatke u zavarenom spoju. Nerazorna ispitivanja pružaju uvid u stanje zavarenog spoja te se na temelju njih donose kasniji zaključci vezani za uspješnost postupka zavarivanja. Od nerazornih metoda ispitivanja provedena je vizualna metoda na svim uzorcima. Metode ispitivanja magnetnim česticama i radiografija provedene su na zavarenim sučeonim spojevima, uzorci 8 i 9, kod kojih postoji sumnja na indikacije.

#### 6.3.1. Vizualna metoda

Značajke zavarenih spojeva potrebno je kontrolirati u sve tri faze zavarivanja, prije, za vrijeme i nakon zavarivanja. Da bi se vizualna kontrola što točnije provela, tijekom vizualnog ispitivanja moraju biti zadovoljeni uvjeti poput osvjetljenosti ispitne površine koja mora iznositi najmanje 500 lx, a udaljenost oka od ispitne površine ne smije biti veća od 600 mm. Također kut promatranja ne smije biti manji od 30° jer se u protivnom gubi osjećaj položaja mjerila pa dolazi do krivog postavljanja istog.

Slike uzoraka prikazane su u tablici 7. i 8. Svi uzorci su zavareni impulsnim MAG zavarivanjem, osim uzorka 4 koji je izveden korištenjem CMT tehnologije zavarivanja.

Uzorci 1 - 7 su kutni zavareni spojevi. Uzorci 1 - 4 zavareni su nešto lošijim dodatnim materijalom za razliku od ostalih uzoraka. Kako bi optimizirali proces, uzorci su zavarivani različitim brzinama. Uzorci su grupirani prema dodatnom materijalu i tehnologiji zavarivanja.

Kod uzorka 1 primjećuje se da su rubni dijelovi zavara slabije protaljeni za razliku od uzorka 2 i 3. Uzorci zadovoljavaju ispitivanje.

Uzorak 4 izveden je najmanjom brzinom zavarivanja kao i najmanjom strujom za razliku od ostalih kutnih spojeva. Zavareni spoj estetski zadovoljava, nema kapljica od prskanja, površina je čista i bez pukotina.



Uzorci 5, 6 i 7 također su izvedeni različitim brzinama zavarivanja. Uzorak 5 ima nešto lošija estetska svojstva, slabije protaljivanje i nejednoliku širinu i nadvišenje zavarenog spoja. Uzorak 6 ima najbolja estetska svojstva, površina zavora je čista, bez prskanja i pukotina, i uz ravnomjerno nadvišenje. Kod uzorka 6 korištena je nešto veća brzina zavarivanja nego kod uzoraka 5 i 7. Uzorak 7 na dijelovima ima slabije protaljivanje, estetski je korektan zavar. Sva tri zavora prolaze vizualnu metodu.

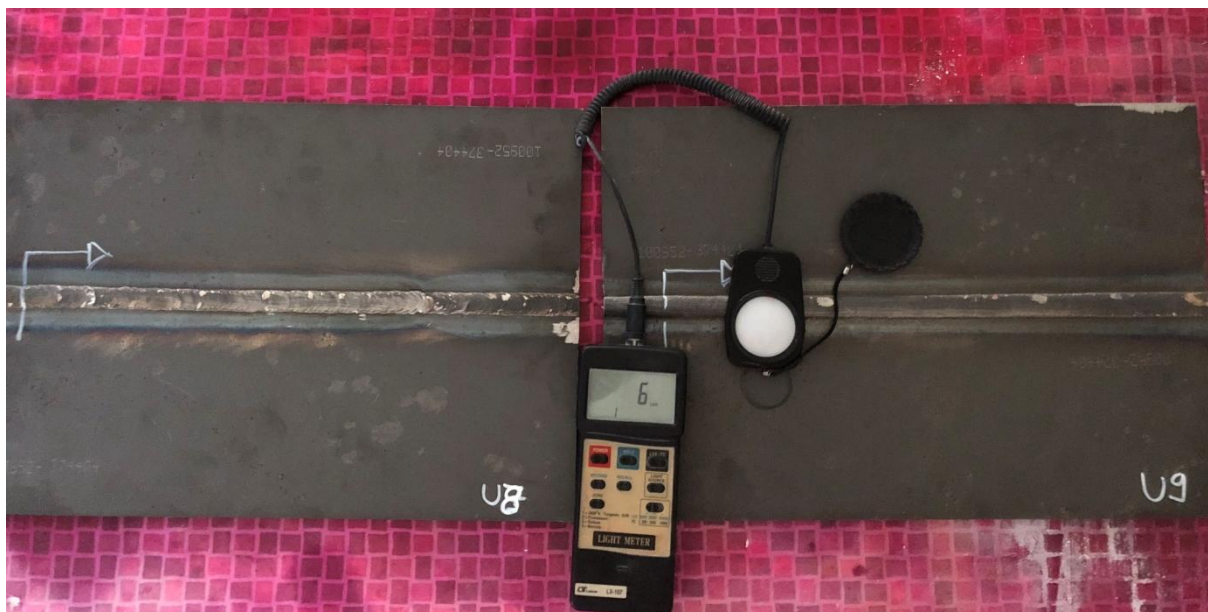
Uzorak 8 i 9 izvedeni su uz predobradu i zavareni spoj se sastoji od dva prolaza, korijena i popune. Uzorak 8 izveden je ručnim zavarivanjem i estetska svojstva su lošija jer imaju nejednoliku širinu zavora. Uzorak 9 koji je izveden robotom ima jako lijepo izveden i korijen i popunu, bez tragova pora, prskanja i pukotina.

### **6.3.2. Ispitivanje magnetnim česticama**

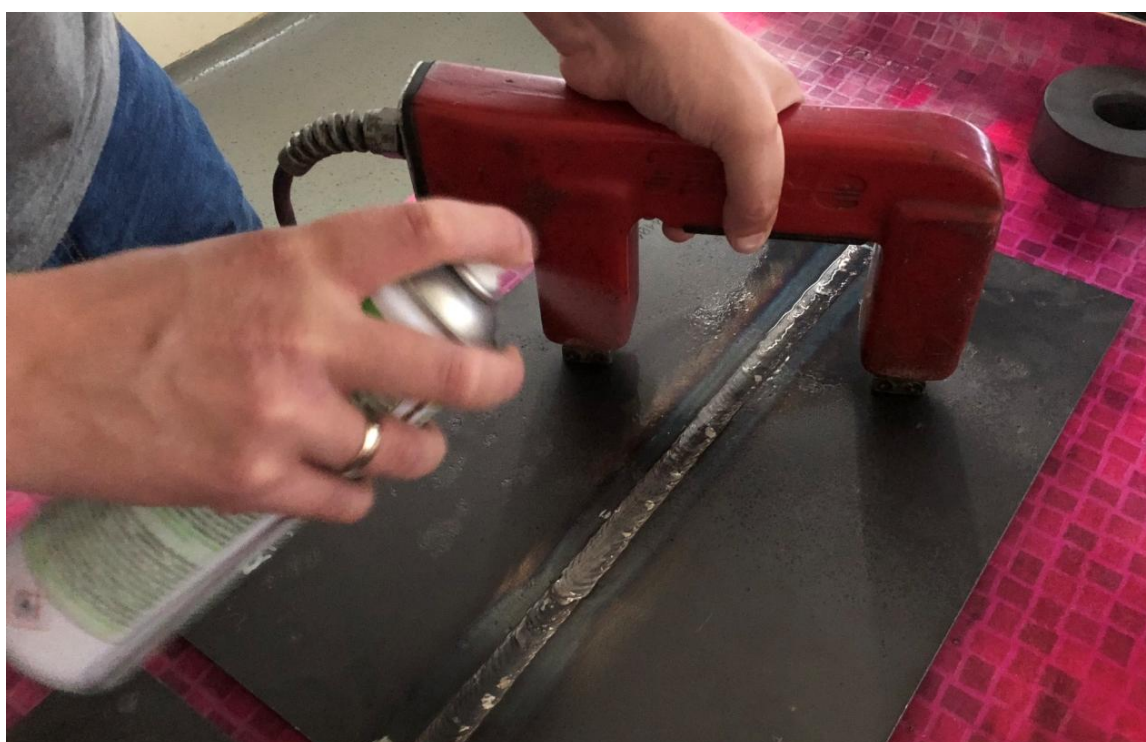
Ispitivanje magnetnim česticama provedeno je na svim uzorcima. Vizualnom metodom utvrđeno je da uzorci imaju glatku površinu i bez nepravilnosti, ali magnetnim česticama utvrdit će se da li postoje diskontinuiteti u obliku pukotina, zareza i dr. Za ispitivanje magnetnim česticama korištene su fluorescentne magnetske čestice radi veće osjetljivosti.

Ispitivanje magnetnim česticama sastoji se od nekoliko koraka. Prvi korak je čišćenje ispitne površine i odstranjivanje četkom, te eventualno brušenje oštrijih neravnina kako ne bi uzrokovale kreiranje lažnih indikacija. Nakon čišćenja na ispitnu površinu nanose se fluorescentne magnetske čestice veličine  $3\mu\text{m}$ . Ove čestice nanose se mokrom tehnikom, naštrecavanjem suspenzije čestica u spreju. Ispitivanje se provodi tehnikom magnetizacije, odnosno s magnetnim jarmom koji u dodiru s ispitnim materijalom zatvara magnetni krug i time magnetizira materijal, te je moguće samo kod feromagnetskih materijala. Naštrecavanje čestica i prolazak jarmom provodi se istodobno kako je prikazano na slici 25. Rezultati, odnosno indikacije očitavaju se pod ultraljubičastim svjetlom i prikazani su u tablici 10.

Čimbenici koji utječu na pouzdanost ispitivanja provjereni su i držani su pod kontrolom tijekom ispitivanja. Zadovoljena je koncentracija čestica u suspenziji, uvjeti promatranja (intenzitet UV svjetla min  $1000\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , rasvjetljenost ispitne površine max 20 lx) te jakost magnetskog polja iznosi 2 - 6 kA/m koje je prikazano na slici 24.

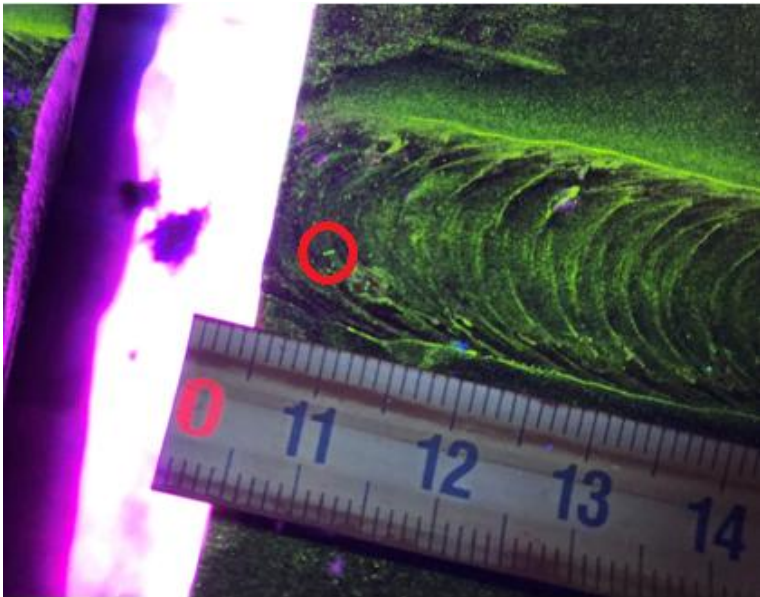



Slika 24. Mjerenje jakosti magnetskog polja



Slika 25. Tijek ispitivanja

Tablica 10. Rezultati ispitivanja magnetnim česticama

<p>Na uzorku 8, u crvenom kružiću, prikazana je indikacija koja je uočena. Indikacija je manja od 2 mm i zanemaruje se sukladno normi HRN EN ISO 9934.</p>	 <p>Uzorak 8</p> <p>The image shows a magnetic particle inspection of a metal surface. A red circle highlights a small, dark, irregularly shaped magnetic indication. A ruler is placed below the indication, showing a scale from 11 to 14 cm. The indication is located between the 11 and 12 cm marks.</p>
<p>Na uzorku 9 uočena je uzdužna indikacija u zavarenom spoju. Indikacija je dužine 2 mm te se zanemaruje. Radi se o nepravilnosti koja ne bi imala presudan značaj za kvalitetu zavarenog spoja.</p>	 <p>Uzorak 9</p> <p>The image shows a magnetic particle inspection of a metal surface. A red circle highlights a small, dark, irregularly shaped magnetic indication. A ruler is placed below the indication, showing a scale from 12 to 16 cm. The indication is located between the 14 and 15 cm marks.</p>



### 6.3.3. Radiografsko ispitivanje

Radiografska metoda je volumna metoda nerazornog ispitivanja i kao takva koristi se za otkrivanje nepravilnosti koje se nalaze u materijalu i nisu otvorene prema površini. Ova metoda koristi svojstva elektromagnetskog zračenja X (rengenskim) i gama (radioizotopnim) zrakama koje za razliku od zraka svjetlosti prodiru kroz sve danas poznate materijale. X-zrake i  $\gamma$ -zrake pripadaju dijelu elektromagnetskog spektra vrlo malih valnih duljina i visoke frekvencije. Ako se u nekom materijalu nalazi nehomogenost ona će zasigurno imati različita svojstva apsorpcije te će se na izlazu iz materijala ispod nehomogenosti jakost energije zračenja razlikovati od izlazne energije na ostalim mjestima.

Ispitivanje se provelo na rendgenskom uređaju BALTEAU GM 300D. Ispitani su uzorci 8 i 9, sučeoni spojevi, kutni spojevi nisu ispitani jer se ne očekuje indikacija. Uzorci su snimani rendgenom na slikovnu ploču Kodak industrex flex HR te nakon toga skenirani skener uređajem VMI 5100. Snimanje rendgenskim uređajem provedeno je sa sljedećim parametrima: napon snimanja 150 kV, struja snimanja 4 mA te vrijeme snimanja 4 minute i 30 sekundi. Parametri skeniranja skener uređaja su: napon lasera 15 V, napon fotomultiplikatora 5,25 V te rezolucija skeniranja 50  $\mu\text{m}$ . Slika 26. prikazuje uređaj BALTEAU GM 300D s parametrima tijekom snimanja. Slika 27. prikazuje izgled rendgen uređaja s kojim je izvedeno snimanje uzoraka.

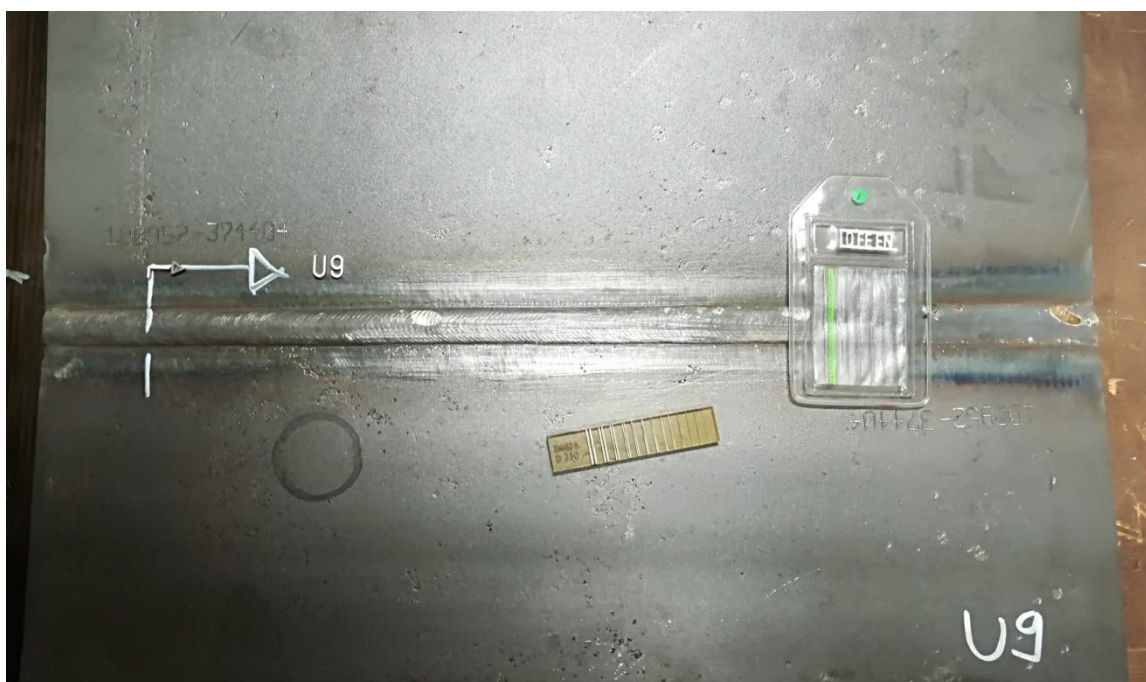


Slika 26. Parametri rendgenskog snimanja



Slika 27. Rendgen uređaj BALTEAU GM 300D

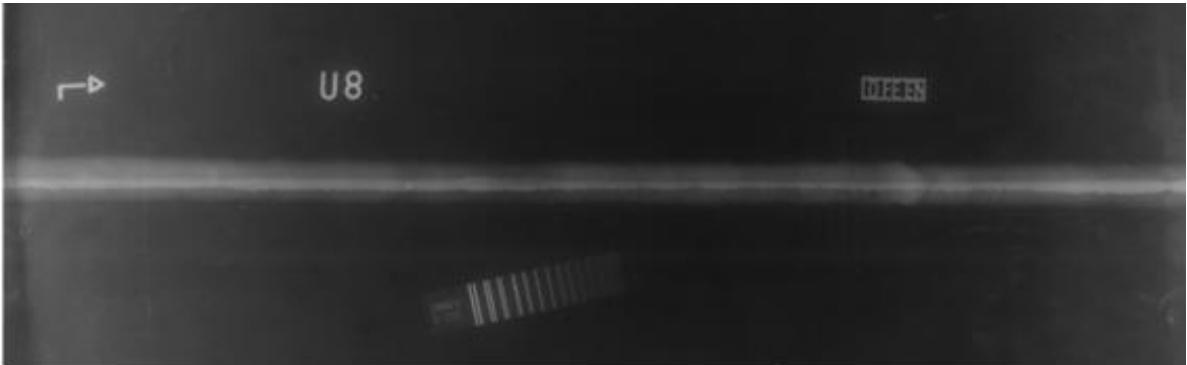
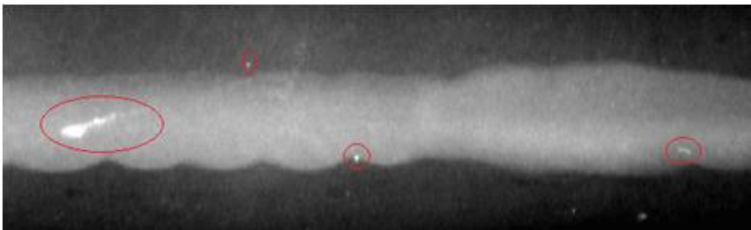
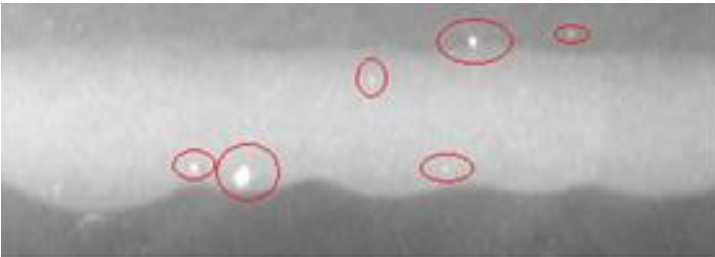
Prije početka snimanja potrebno je pripremiti uzorak koji se snima. Na slici 28. prikazan je uzorak sa svim potrebnim indikatorima. Na toj slici se vidi indikator kvalitete radiograma, broj koji označava broj uzorka, strelica koja označava smjer zavarivanja te kao indikator prostorne rezolucije korišten je duplex indikator.



Slika 28. Uzorak sa svim indikatorima

Rezultati radiografskog ispitivanja prikazani su u tablici 11.

Tablica 11. Rezultati radiografskog ispitivanja sučeljenog zavarenog spoja

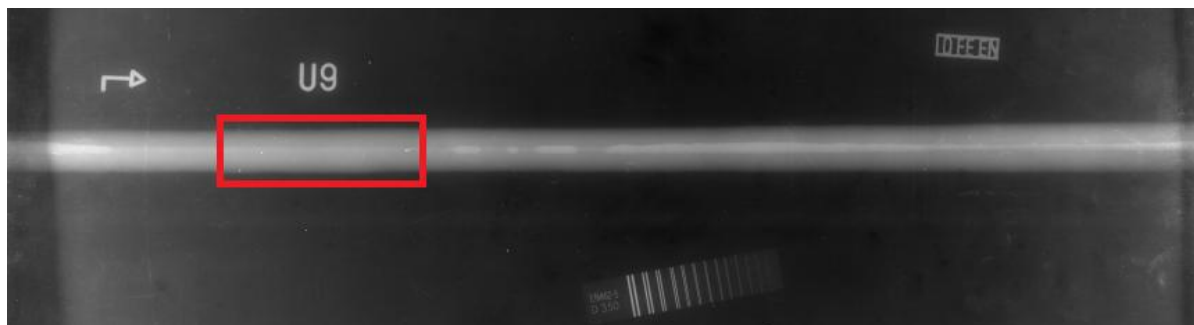

Snimka cijelog uzorka – Uzorak 8

Uvećani dio - Uzorak 8a

Uvećani dio - Uzorak 8b

Na uvećanim snimkama uzorka 8 mogu se primijetiti nepravilnosti u zavarenom spoju koje su ujedno označene na slikama pomoću crvenih krugova.

Na uzorku 8a prikazane su nepravilnosti unutar materijala koje su klasificirane kao sitne pore. Pore se mogu prepoznati po pravilnom okruglom obliku.

Na uzorku 8b također su označene sitne pore no po sredini zavarenog spoja imamo indicaciju nešto većeg oblika.

Kroz cijeli uzorak nalaze se sitne pore, pore smanjuju mehanička svojstva zavarenog spoja, te njihova pojava znači da je zavareni spoj loše izveden.



Snimka cijelog uzorka - Uzorak 9



Uvećani dio – Uzorak 9a

Na uvećanoj slici 9a vidljive su nepravilnosti u obliku pora. Uzorak 9 nema po cijeloj dužini nepravilnosti, samo uvećani dio je dio uzorka koji je pokazao nepravilnosti. Sukladno normi HRN EN ISO 5817:2008, klasa B zavarenih spojeva, smatra da nisu smanjena mehanička svojstva i da je zavareni spoj kvalitetan.

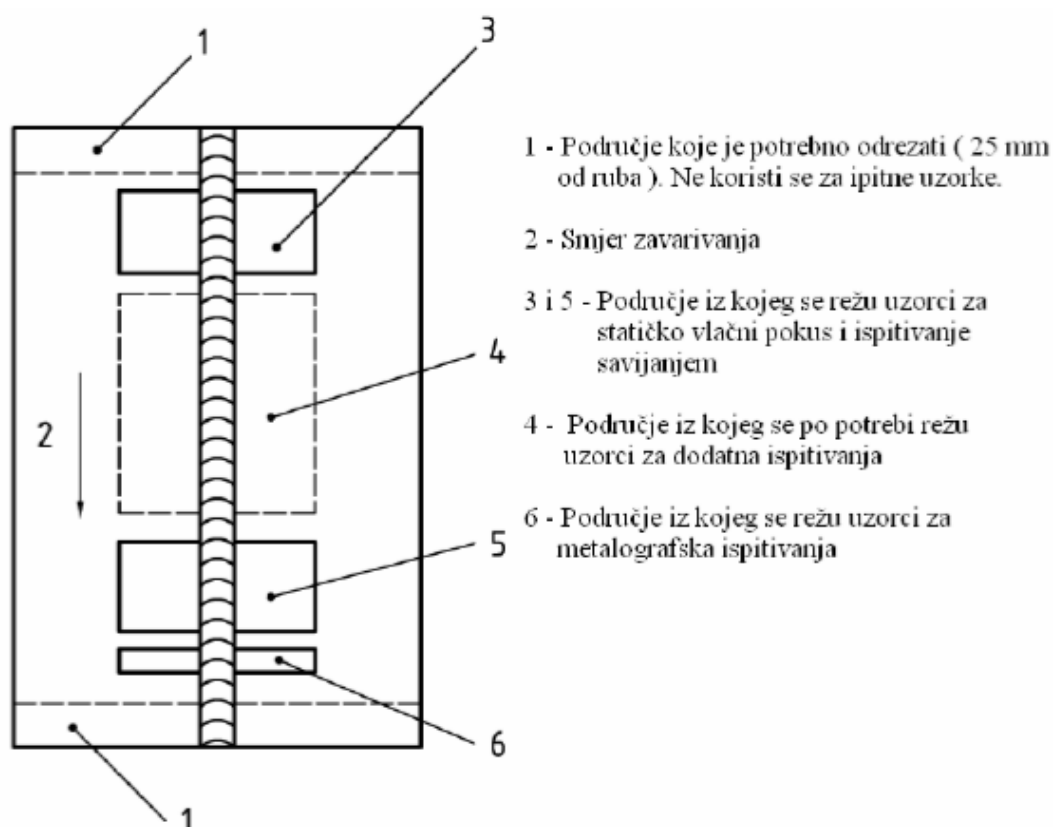
#### 6.4. Razorna ispitivanja

Nakon nerazornih ispitivanja na red dolaze razorna ispitivanja. Kako samo ime govori to su ispitivanja u kojima se uzorci režu na razne epruvete i manje uzorke kako bi se podvrgnuli različitim pokusima preko kojih se dobivaju informacije o mehaničkim svojstvima zavarenog spoja, profilu zavarenog spoja te veličini zone utjecaja topline. Svi provedeni testovi pobliže su opisani u sljedećim poglavljima.

##### 6.4.1. Priprema uzoraka

Da bi se ispitivanja mogla uspješno provesti potrebno je izvesti pripremu uzoraka. Zavarene ploče potrebno je izrezati na odgovarajuću veličinu za provođenje ispitivanja. Shematski prikaz izrezivanja prikazan je na slici 29. Nestabilnosti električnog luka koje se javljaju na početku zavarivanja mogu uzrokovati nepravilnosti te se zbog toga odbacuje početnih 25 mm uzorka te se taj dio ne koristi za nikakva ispitivanja. Izrezivanje uzoraka izvedeno je sukladno normama HRN EN ISO 15614-1:2007.

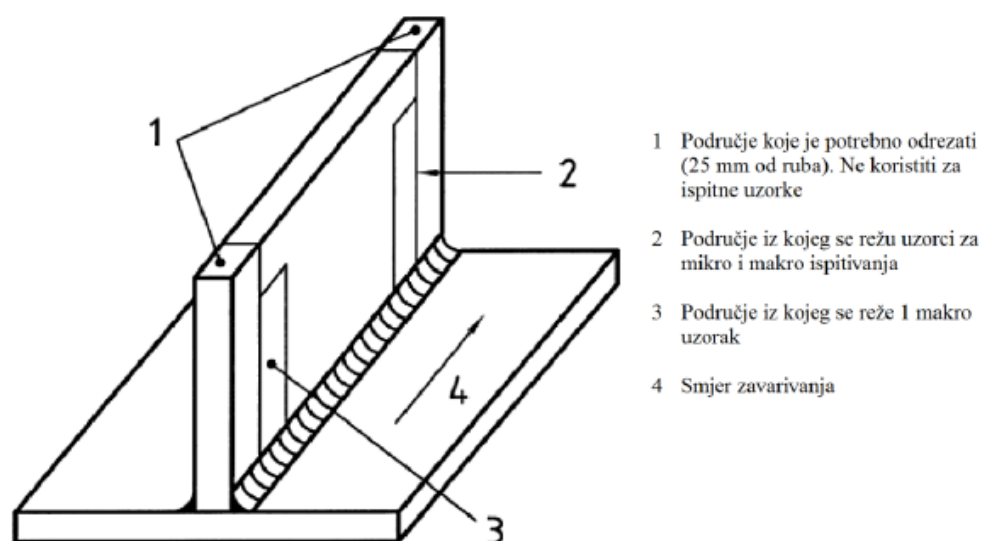




Slika 29. Shematski prikaz izrade ispitnih uzoraka na zavarenom sučeljenom spoju sukladno normi HRN EN ISO 15614-1:2007

Iz jednog ispitnog uzorka sa sučeljenim spojem izrezano je 4 epruvete za ispitivanje savijanjem, 2 epruvete za statičko vlačni test i 1 makro izbrusak.

Isto kao što postoji shematski prikaz izrade ispitnih uzoraka za zavareni sučeljeni spoj tako postoji i shematski prikaz izrade uzoraka za zavareni kutni spoj koji je prikazan na slici 30.



Slika 30. Shematski prikaz izrade ispitnih uzoraka na zavarenom kutnom spoju sukladno normi HRN EN ISO 15614-1:2007



Iz kutnih uzoraka izrezani su makro izbrusci, po jedan komad iz svakog uzorka. Izrezivanje uzoraka provedeno je u Laboratoriju za zavarivanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, pomoću plazma uređaja.

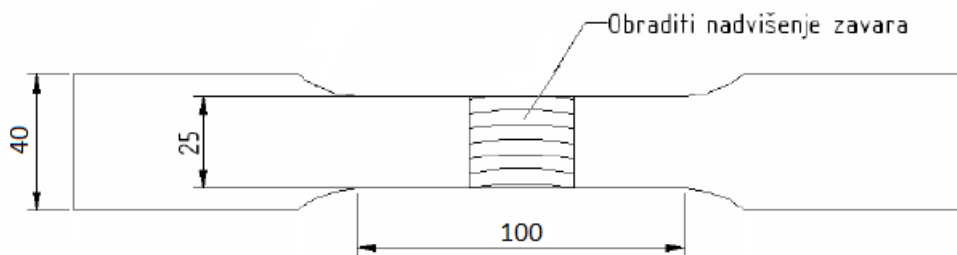
Nakon izrezivanja epruvete je potrebno još dodatno pripremiti za pojedine testove. Epruvetama za makroizbruske nakon izrezivanja turpijaju rubovi da se skine srh koji je ostao nakon izrezivanja te im se površina brusi s brusnim papirima različitih granulacija, a zatim se polira. Za brušenje su korišteni brusni papiri granulacije redom 80, 180, 320, 500, 1000, 2000. Nakon poliranja vrši se ispiranje površine alkoholom i vodom kako bi se odstranile masnoće i sitne granule skinutog osnovnog materijala. Kada je mehanička obrada uzorka završena izvodi se kemijska obrada sredstvom za nagrivanje materijala. Površina makroizbrusaka nagriza se 3% nitalom. Nagrivanjem površine dobije se uočljiv izgled strukture zavarenog spoja.

Za ispitivanja savijanjem izrezane epruvete je potrebno samo pobrusiti tako da se uklone nadvišenja lica zavarenog spoja i korijena. Osim uklanjanja nadvišenja brušenjem se uklanjaju i mikropukotine koje su mogle nastati kod izrezivanja epruveta, a koje bi mogle uzrokovati prijevremeno pucanje ispitnih epruveta. Na slici 31. prikazan je izgled epruvete nakon brušenja. Nakon brušenja epruveta je spremna za ispitivanje savijanjem. Kao što je vidljivo na slici 31. površina je dovoljno glatka i nema nikakvih nadvišenja koja bi mogla kompromitirati ispitivanje.



*Slika 31. Epruveta za ispitivanje savijanjem*

Epruvete za statičko vlačno ispitivanje oblikuju se strojnom obradom odnosno glodanjem. Nakon toga se stupnom brusilicom uklanjaju nadvišenja zavarenog spoja te srh. Slika 32. prikazuje dimenzije epruveta za statičko vlačno ispitivanje. Nakon strojne obrade i brušenja nadvišenja zavarenog spoja, epruveta je spremna za provedbu ispitivanja.

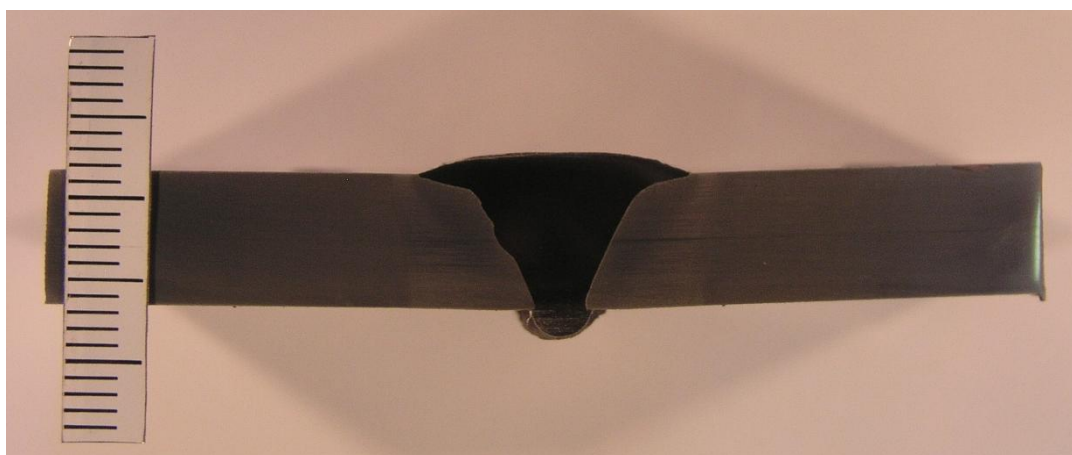


Slika 32. Skica epruvete za statičko vlačno ispitivanje

#### 6.4.2. Makroizbrusci

Izrada uzoraka za makroanalizu provedena su sukladno normi HRN EN ISO 17639:2013. Norma navodi da uzorci koji se koriste za makroskopska ispitivanja moraju biti orijentirani poprečno na zavareni spoj i to za sučeljeni i kutni zavareni spoj, moraju obuhvaćati zavareni spoj te zonu utjecaja topline s obje strane zavarenog spoja.

Slika 33. prikazuje makroizbrusak sučeonog spoja uzorka 1 na kojem se jasno vidi metal zavora, zona staljivanja i ZUT. Zavar posjeduje umjereno nadvišenje od 1,5 mm. U zavarenom spoju nema pora i uključaka. Iako je radiografsko ispitivanje pokazalo sitne pore, na ovom uzorku se ne vide. Prema profilu zavora se vidi da je unos topline bio premali, u zoni staljivanja nije došlo do miješanja osnovnog i dodatnog materijala pa je došlo do naljepljivanja.



Slika 33. Uzorak 1 – sučeonni spoj

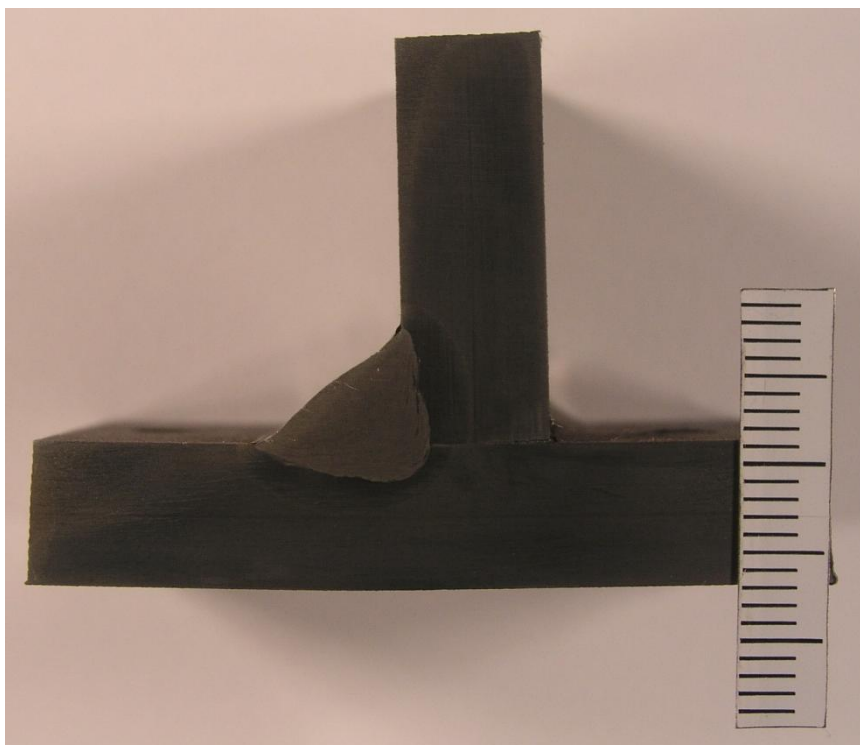
Slika 34. prikazuje makroizbrusak sučeonog spoja uzorka 2 na kojem se jasno vidi metal zavora, zona staljivanja i ZUT. Za razliku od uzorka 1, uzorak 2 ima nešto veće protaljivanja u zoni staljivanja. Međutim, i dalje nije došlo do protaljivanja cijele površine te zbog

naljepljivanja su smanjena mehanička svojstva zavora. U metalu zavora nisu uočene pore i nepravilnosti.



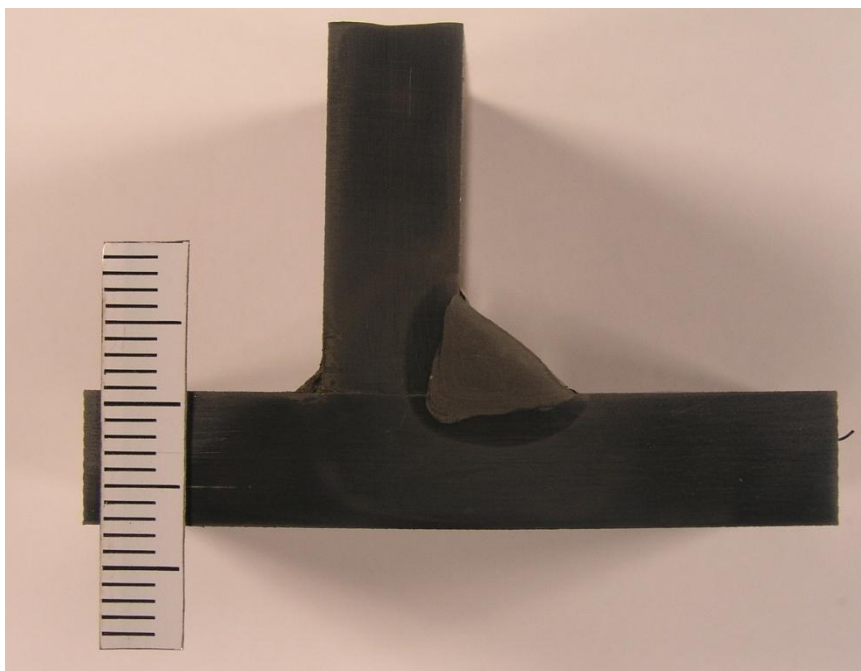
*Slika 34. Uzorak 2 – sučeoni spoj*

Slika 35. prikazuje makroizbrusak uzorka 1 kutnog spoja kod kojeg je jasno vidljiv metal zavora, zona staljivanja i ZUT. Kutni spoj je izveden bez predobrade. ZUT je zadovoljavajući, također i zona staljivanja gdje je jasno vidljiva penetracija metala zavora. Nisu uočene pore i nepravilnosti.

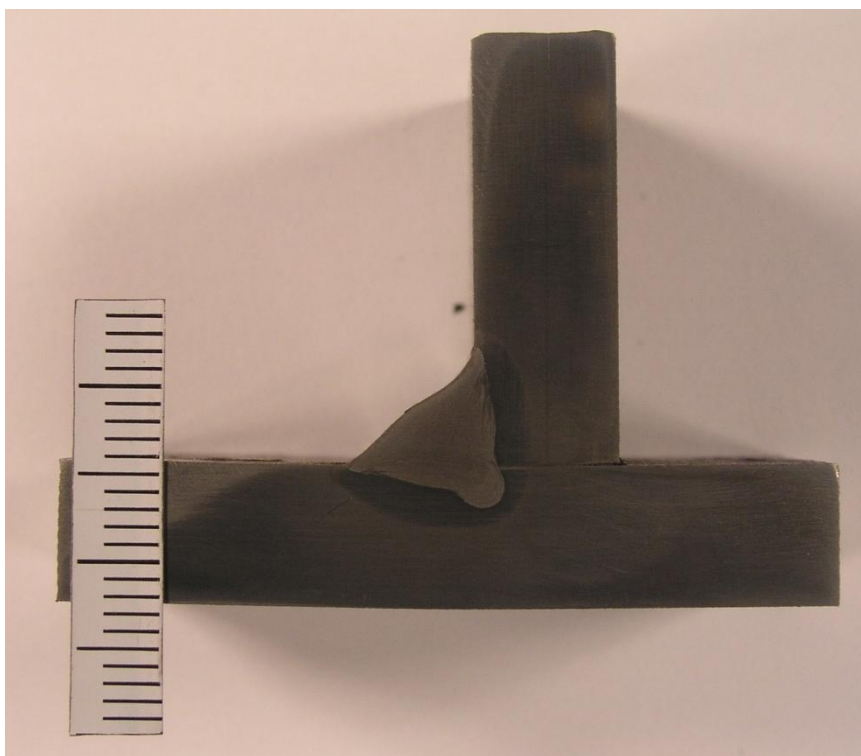


*Slika 35. Uzorak 1 – kutni spoj*

Slika 36. i 37. prikazuju makroizbruske uzoraka 2 i 3 kutnog zavarenog spoja kod kojih je jasno vidljiv metal zavara, zona staljivanja i ZUT. Kutni spojevi izvedeni su bez predobrade. Za razliku od uzorka 1 kutnog spoja, korištena je veća brzina i struja zavarivanja. Sukladno tome ostvarena je veća penetracija. Površine metala zavara ne pokazuju nepravilnosti u obliku pora i pukotina.

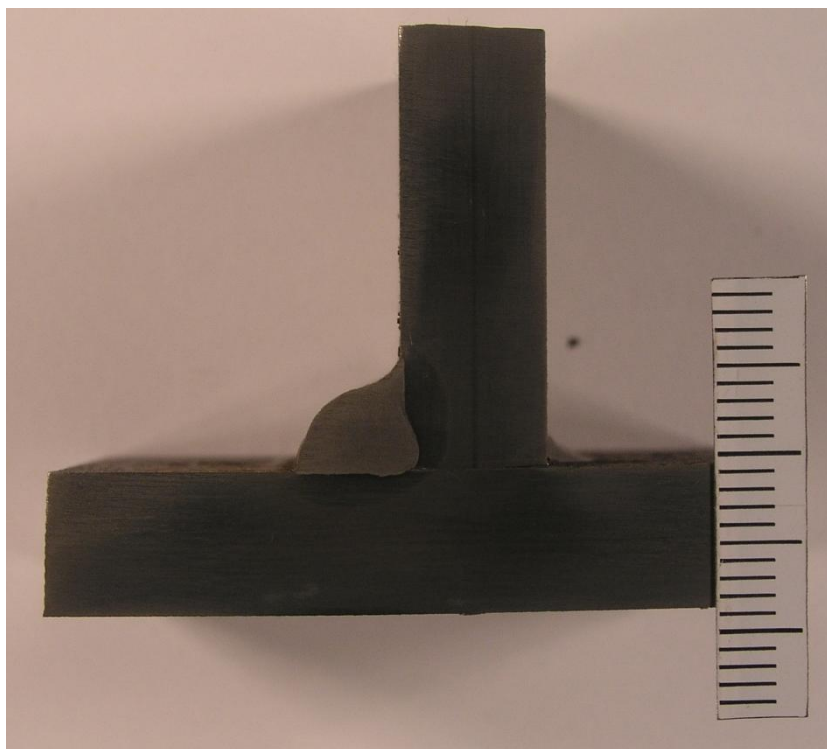


*Slika 36. Uzorak 2 – kutni spoj*



*Slika 37. Uzorak 3 – kutni spoj*

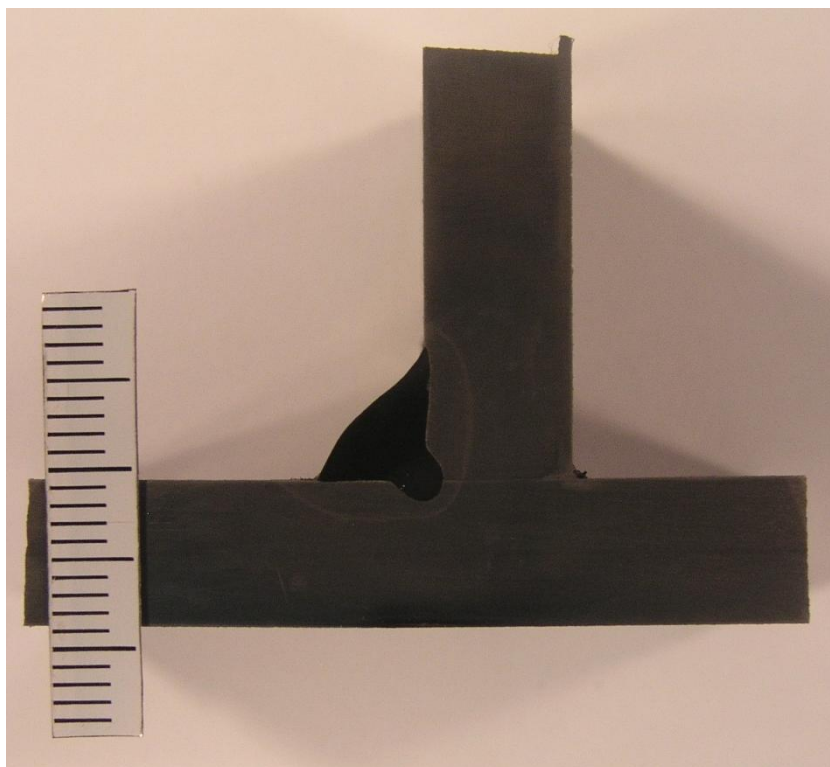
Slika 38. prikazuje makroizbrusak uzorka 4 kutnog spoja kod kojeg je jasno vidljiv metal zavara, zona staljivanja i ZUT. Kutni spoj je izveden bez predobrade i CMT procesom zavarivanja. U zoni staljivanja vidljivo je da metal zavara nije potpuno penetrirao te je došlo do naljepljivanja. Metal zavara nema naznaka nepravilnosti i pora, ali zbog naljepljivanja ne posjeduje tražena svojstva.



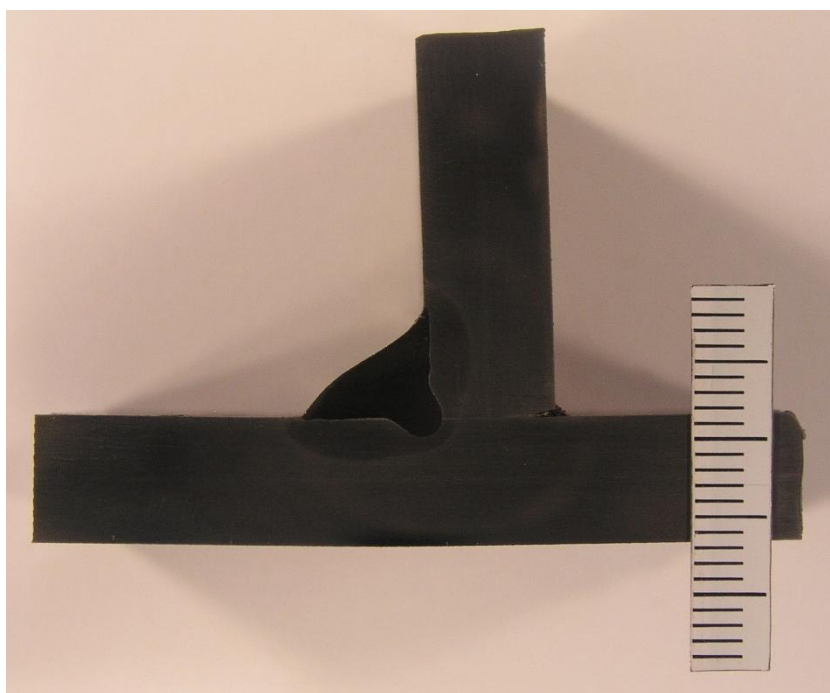
*Slika 38. Uzorak 4 – kutni spoj*

Slika 39. i 40. prikazuju makroizbruske uzoraka 5 i 7 kutnog zavarenog spoja kod kojih je jasno vidljiv metal zavara, zona staljivanja i ZUT. Kutni spojevi izvedeni su bez predobrade. Na slikama se može vidjeti da je došlo do djelomičnog protaljivanja. Zavari izvana izgledaju estetski zadovoljavajuće, ali zbog naljepljivanja metala zavara ne posjeduju potrebna mehanička svojstva. Metal zavara uzoraka nema naznaka pora i nepravilnosti.

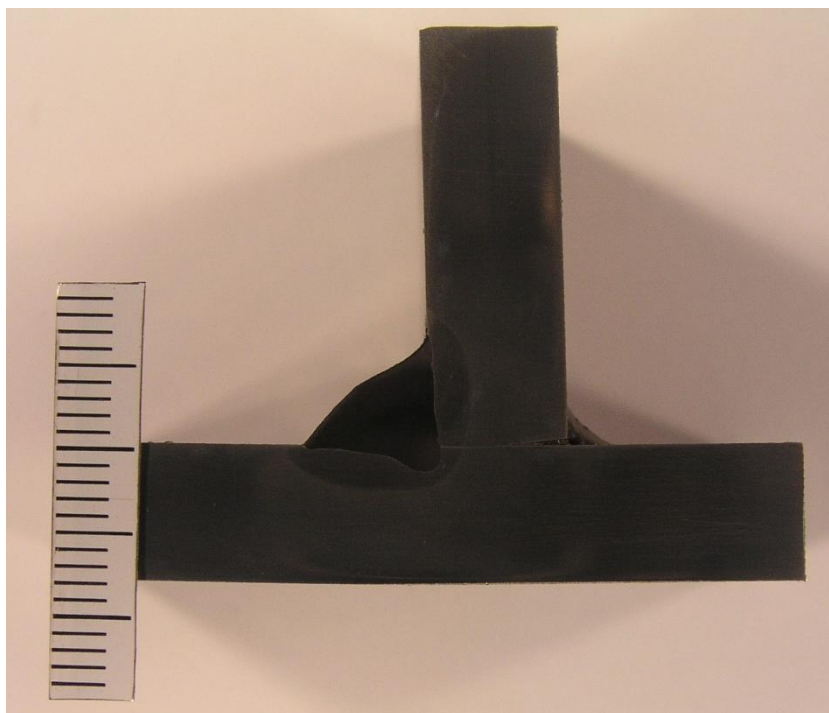




*Slika 39. Uzorak 5 – kutni spoj*



*Slika 40. Uzorak 7 – kutni spoj*



Slika 41. Uzorak 6 – kutni spoj

Slika 41. prikazuje makroizbrusak uzorka 6 kutnog spoja kod kojeg je jasno vidljiv metal zavora, zona staljivanja i ZUT. Kutni spoj je izveden bez predobrade. Uzorak 6 u odnosu na uzorke 5 i 7, koji su također izvedeni istim dodatnim materijalom kao uzorak 6, izveden je sa većom brzinom i strujom zavarivanja, što je rezultiralo i većom penetracijom u odnosu na druga dva uzorka. Metal zavora je bez nepravilnosti i pora.

#### 6.4.3. Ispitivanje savijanjem

Ispitivanje savijanjem proves će se sukladno normi HRN EN ISO 5173:2010 Ispitivanja razaranjem zavora na metalnim materijalima - Ispitivanja savijanjem. Prvo je potrebno izračunati vrijednost promjera trna kojim će se provoditi ispitivanje te razmak između valjaka kojima će se provoditi ispitivanje. Dimenzioniranje trna izračunava se prema sljedećoj formuli:

$$d = \frac{100xt_s}{A} - t_s \text{ [mm]} \quad (6.1)$$

Gdje je:

$d$  – promjer trna, mm

$t_s$  – debljina epruvete, mm

$A$  – istezljivost osnovnog materijala, %

Istezljivost se očita iz atesta osnovnog materijala i iznosi 16 %, a debljina materijala je 8 mm. Nakon uvrštavanja u formulu dobiva se da promjer trna iznosi 42 mm. Vrijednost koja se dobije zaokružuje se na okruglu vrijednost i to je 40 mm.

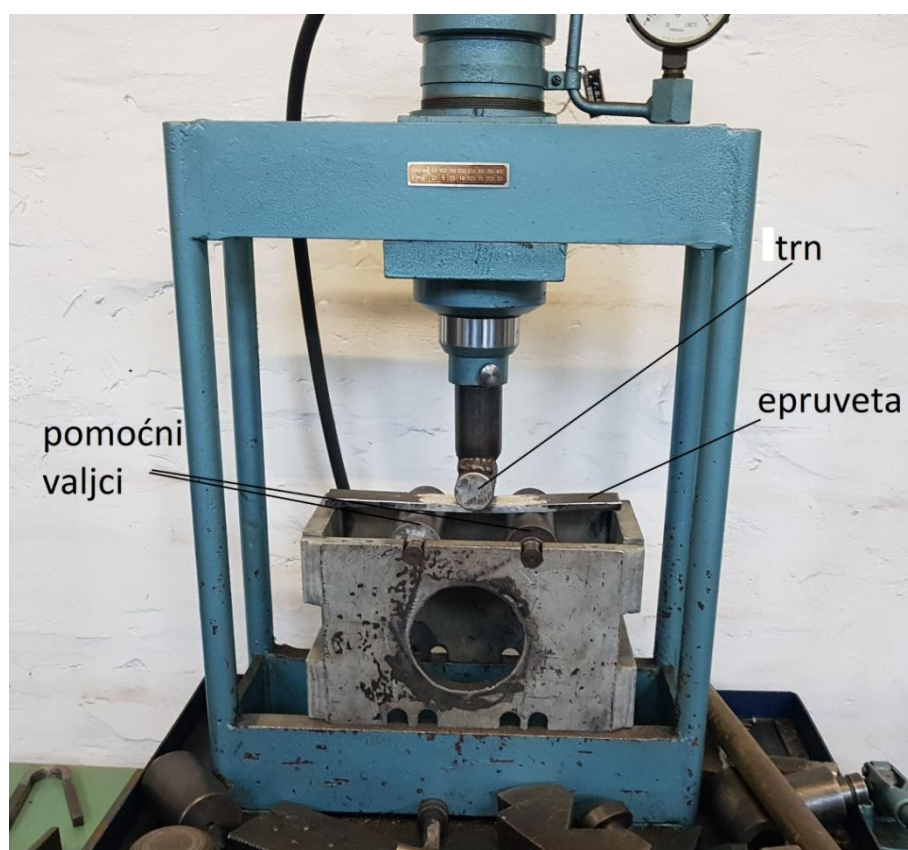
Prema normi HRN EN ISO 5173:2010 razmak između valjaka iznosi:

$$d + 2 ts < l \leq d + 3 ts$$

$$40 + 16 < l \leq 40 + 24$$

Odabrani razmak iznosi 60 mm.

Na slici 42. nalazi se naprava na kojoj se provodi ispitivanje. Kao što se vidi na slici naprava se sastoji od postolja na kojem se nalazi postolje s dva pomoćna valjka te hidrauličkog cilindra na koji je stegnut trn. Kod ispitivanja epruveta se postavlja na pomoćne valjke te se centrira tako da trn pritišće epruvetu na mjestu zavarenog spoja. Prema normi ispitivanje se provodi sve dok se ne osjeti ili ne vidi na epruveti pukotina te se u tom trenutku prekida ispitivanje, mjeri se pukotina i kut pod kojim se savila epruveta. Ispitivanje se provodi na 4 pripremljene epruvete od svakog uzorka i to tako da se sa dvije epruvete ispituje korijen, a s druge dvije lice zavarenog spoja.

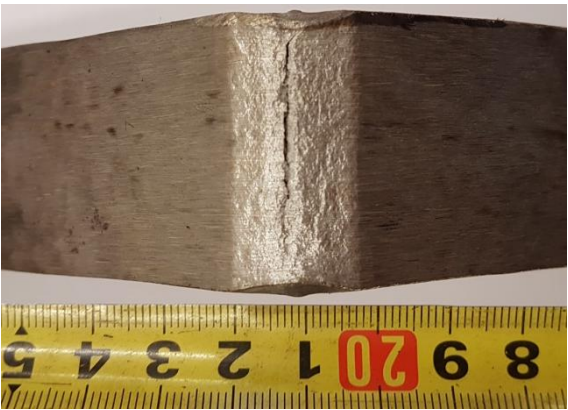
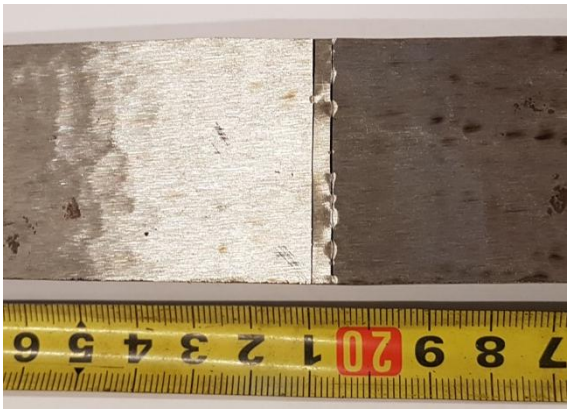

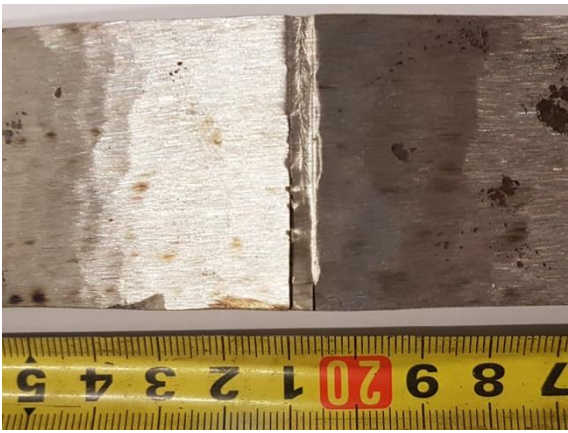


Slika 42. Naprava za ispitivanje savijanjem



Rezultati ispitivanja savijanjem prikazani su u sljedećim tablicama, a brojčane vrijednosti dobivenih kutova  $\alpha$  [°] za pojedinu epruvetu prikazane su u tablicama ispod slika. U tablici 12. prikazane su slike epruveta načinjenih iz uzorka 8, a u tablici 13. prikazane su brojčane vrijednosti izmjerenih kutova.

Tablica 12. Rezultati ispitivanja savijanjem – uzorak 8

Uzorak 8	
Lice zavarenog spoja	Korijen zavarenog spoja
 <p>Epruveta 8-1</p>	 <p>Epruveta 8-3</p>
 <p>Epruveta 8-2</p>	 <p>Epruveta 8-4</p>


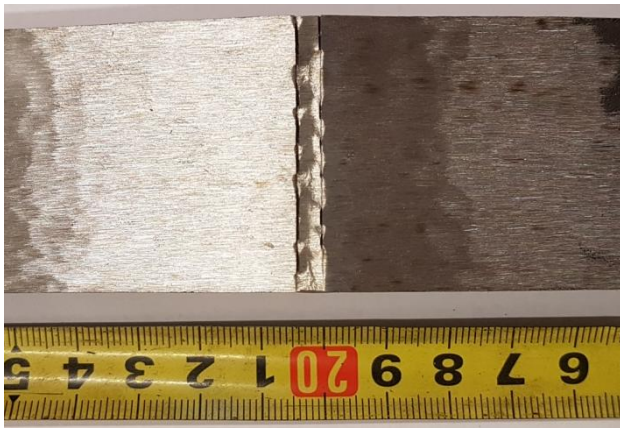
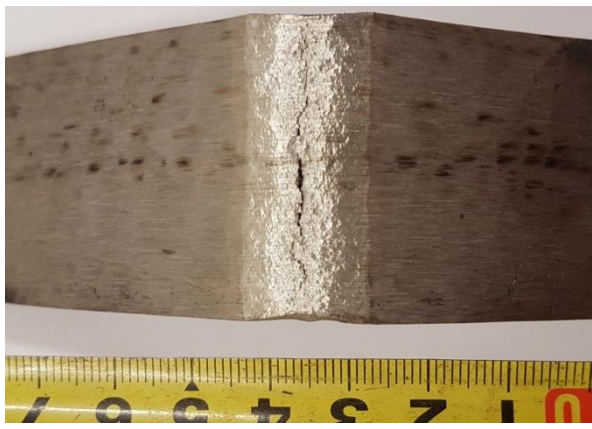

Tablica 13. Brojčane vrijednosti kutova – Uzorak 8

	Epruveta 8-1	Epruveta 8-2	Epruveta 8-3	Epruveta 8-4
$\alpha$ , °	46°	52°	8°	9°

Kod ispitivanja epruveta od uzorka 1 vidljivo je da je kod svih epruveta došlo do loma. Lice zavarenog spoja puklo je po sredini metala zavora, izdržalo je veći kut savijanja ali zavareni spoj nije zadovoljilo. Korijen zavarenog spoja pukao je pri malom kutu savijanja. Treba napomenuti kako je do puknuća došlo između metala zavora i osnovnog materijala, što je još jedan dokaz da je došlo do naljepljivanja. Takvo pucanje epruvete nije pogodno za zavareni spoj jer dokazuje iznimno malu duktilnost.

U tablici 14. Prikazane su epruvete uzorka 9, a u tablici 15. brojčane vrijednosti izmjenjenih kutova.

Tablica 14. Rezultati ispitivanja savijanjem – uzorak 9

Uzorak 9	
Lice zavarenog spoja	Korijen zavarenog spoja
 <p>Uzorak 9-1</p>	 <p>Uzorak 9-2</p>
 <p>Uzorak 9-3</p>	 <p>Uzorak 9-4</p>

Tablica 15. Brojčane vrijednosti kutova – Uzorak 9

	Epruveta 9-1	Epruveta 9-2	Epruveta 9-3	Epruveta 9-4
$\alpha, ^\circ$	74°	78°	16°	21°

Ispitne epruvete uzorka 9 nisu zadovoljile ispitivanje savijanjem, kod svih epruvete dogodio se lom. Lice zavarenog spoja izdržalo je veći kut savijanja od uzorka 8. Korijen zavarenog spoja izdržao je nešto veće kutove od uzorka 8, ali takav zavareni spoj nije zadovoljio. Također je kod korijena zavarenog spoja došlo do pucanja između metala zavara i osnovnog materijala što potvrđuje naljepljivnje metala zavara. Epruvete uzorka 9 nisu zadovoljile tj. uzorak 9 nije zadovoljio ispitivanje savijanjem.

#### 6.4.4. Statičko vlačno ispitivanje

Statički vlačni pokus je postupak ispitivanja kojim se utvrđuju osnovne značajke mehaničkih svojstava, te je to ujedno i najčešće primjenjeno ispitivanje mehaničkih svojstva. Prirast sile pri statičkom vlačnom ispitivanju u jedinici vremena mora biti takav da prirast proizvedenog naprezanja bude  $\leq 10 \text{ N/mm}^2$  u sekundi. Za takvo sporo opterećivanje je najprikladniji hidraulični pogon kidalice. Kod takvog hidrauličkog sistema moguće je u svakom trenutku rasteretiti ispitni uzorak. Za potrebe ispitivanja potrebno je pripremiti epruvete koje se pripremaju prema normi HRN EN ISO 6892-1 Metalni materijali - Vlačno ispitivanje - 1. dio: Metoda ispitivanja pri sobnoj temperaturi. Ispitivanje se provodi na ispitnim uzorcima četvrtastog poprečnog presjeka (Slika 36.).

Ispitivanje statičko vlačnim pokusom provedeno je na kidalici EU 40 MOD, koja je prikazana na slici 43., u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Norma koja se koristila za statički vlačni pokus je HRN EN 10002-1.

Rezultati ispitivanja bilježeni su u računalu, slika 43., te su iscrtani dijagrami za svaki od ispitnih uzoraka. Iz svake zavarene ploče izrezane su dvije epruvete na različitim dijelovima ploče i sukladno tome označeni. Rezultati ispitivanja prikazani su u nastavku.



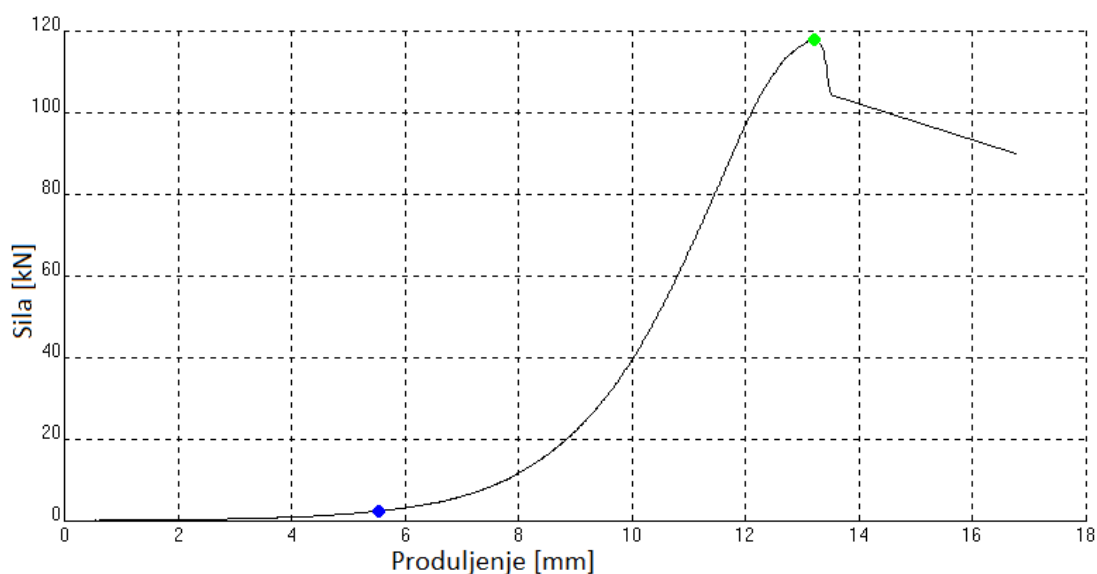


*Slika 43. Kidalica EU 40 MOD*

Na slici 44. prikazana je epruveta 8-1 na kojoj se vidi puknuće epruvete. Veći dio puknuća propagirao se kroz metal zavara odnosno zavareni spoj. Prema certifikatu osnovnog materijala vlačna čvrstoća osnovnog materijala mora biti unutar granica od 1250 do 1550 N/mm<sup>2</sup>. Prema atestu dodatnog materijala vlačna čvrstoća iznosi 600 N/mm<sup>2</sup>. Samim time dolazi se do zaključka da će epruveta puknuti u području metala zavara, što potvrđuje i rezultat koji pokazuje da je vlačna čvrstoća zavarenog spoja 587 N/mm<sup>2</sup>. Vrijednost vlačne čvrstoće nalazi se u granicama tolerancije te sukladno tome zavareni spoj zadovoljava. Slika 45. prikazuje dijagram sila-produljenje na kojem se može vidjeti maksimalna sila i sila kidanja. Maksimalna sila  $F_m$  iznosi 117,81 kN.

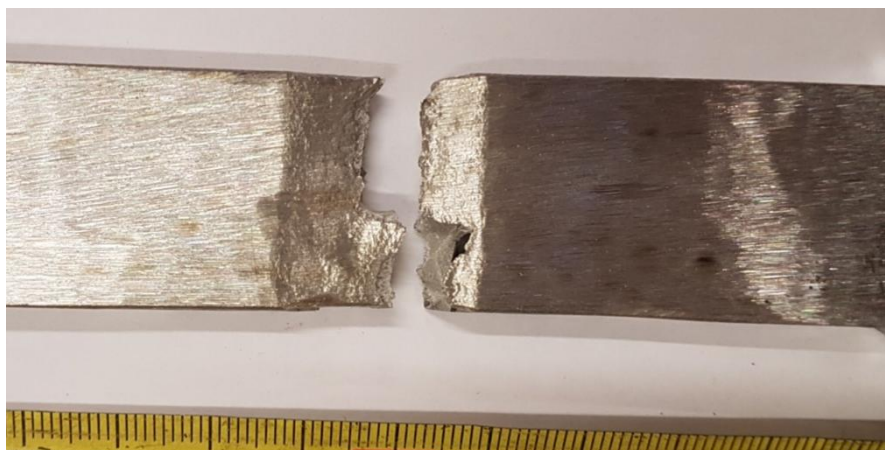


Slika 44. Epruveta 8-1 – tlocrt pogled

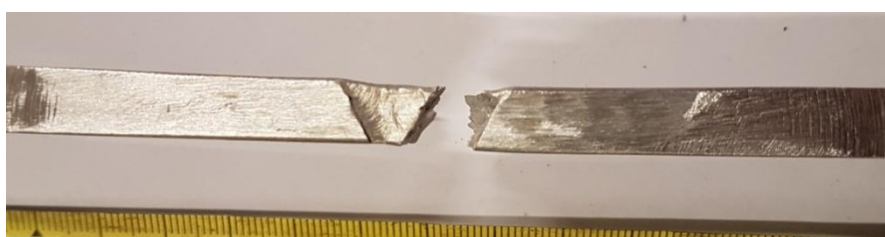


Slika 45. Dijagram sila-produljenje – epruveta 8-1

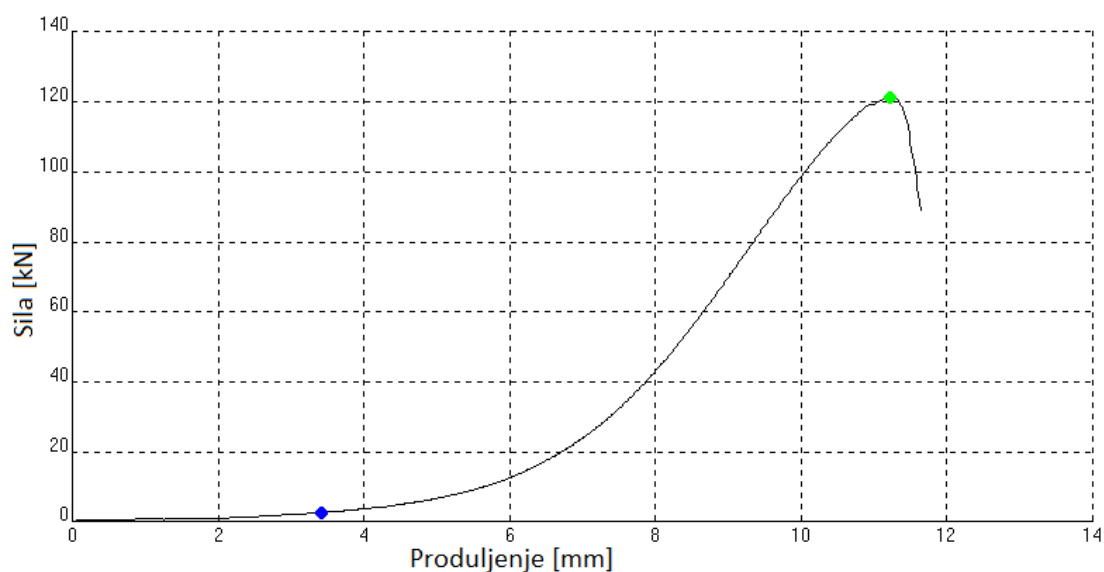
Na slici 46. i 47. prikazana je epruveta 8-2 na kojoj se vidi puknuće epruvete. Puknuće se propagiralo kroz metal zavara i zonu staljivanja. Na slici 47. jasno se vidi kako je zavareni spoj pukao u zoni staljivanja što dokazuje već prije napisano da je došlo do naljepljivanja metala zavara na osnovi materijal. Vlačna čvrstoća zavarenog spoja iznosi  $597 \text{ N/mm}^2$  što je u granicama tolerancije i zadovoljava zahtjeve zavarenog spoja. Slika 52. prikazuje dijagram sila-produljenje na kojem se može vidjeti maksimalna sila i sila kidanja. Maksimalna sila  $F_m$  iznosi 120,97 kN.



Slika 46. Epruveta 8-2 – tlocrt pogled



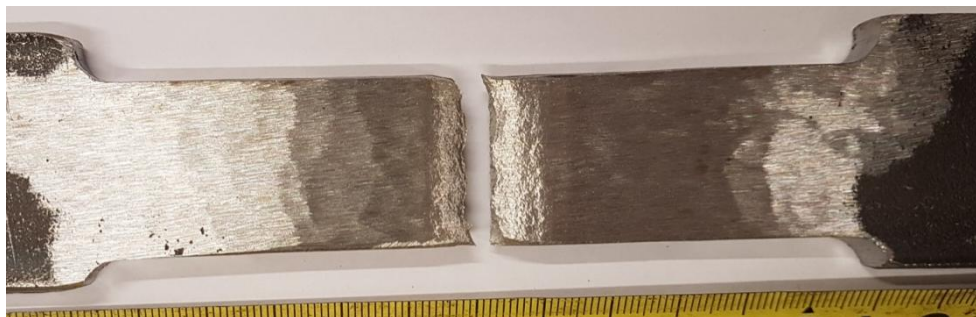
Slika 47. Epruveta 8-2 – bočni pogled



Slika 48. Dijagram sila-produljenje – uzorak 8-2

Slika 49. i 50. prikazuju epruvetu 9-3 na kojoj se vidi puknuće epruvete. Puknuće je propagiralo kroz metal zavora i zonu staljivanja. Na slici 51. vidljivo je kako je dio zavarenog spoja pukao u zoni staljivanja, gdje je došlo do naljepljivanja prilikom zavarivanja. Vlačna čvrstoća zavarenog spoja iznosi  $589 \text{ N/mm}^2$  što je u granicama tolerancije i zadovoljava

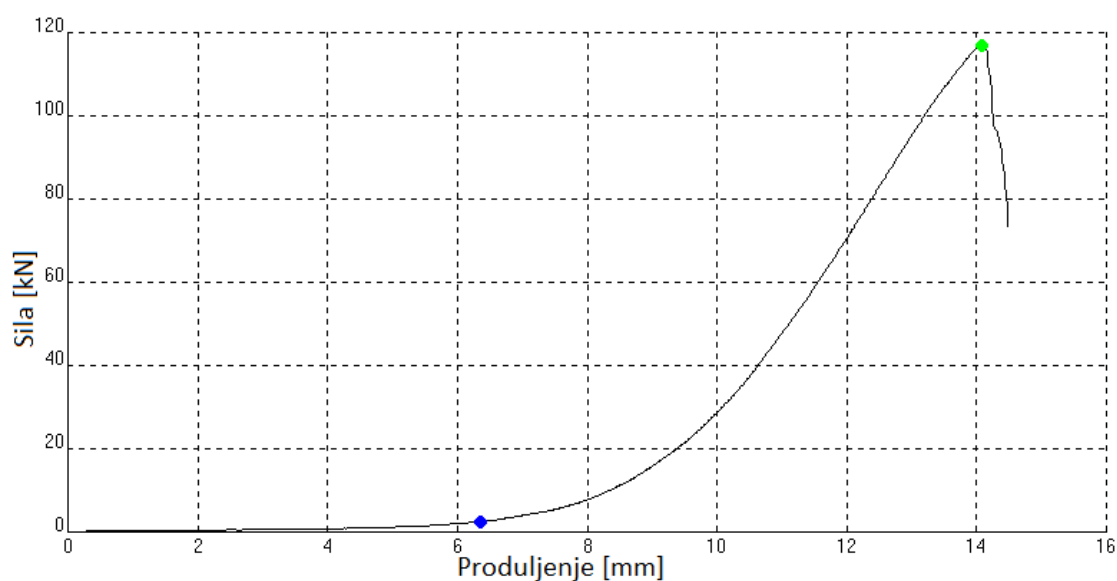
zahtjeve zavarenog spoja. Slika 52. prikazuje dijagram sila-produljenje na kojem se može vidjeti maksimalna sila i sila kidanja. Maksimalna sila  $F_m$  iznosi 117,02 kN.



Slika 49. Epruveta 9-3 – tlocrt pogled



Slika 50. Epruveta 9-3 – bočni pogled

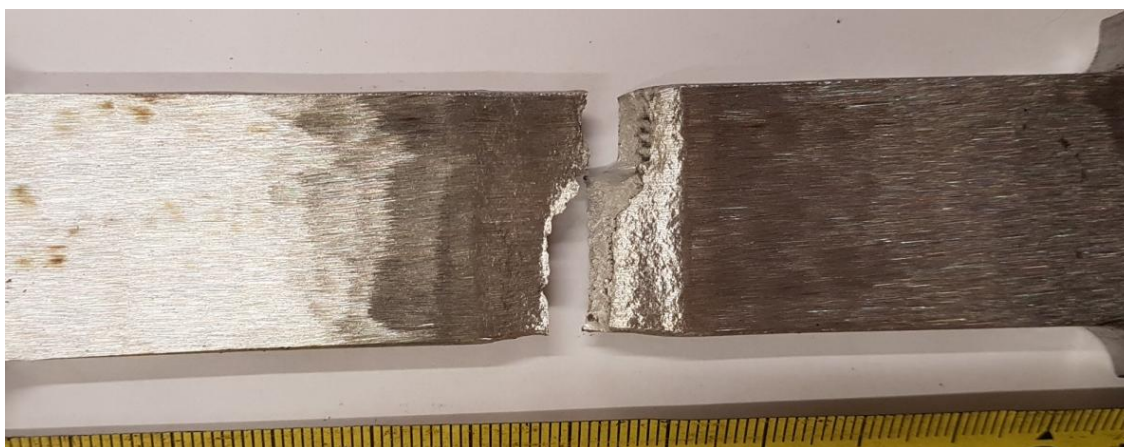


Slika 51. Dijagram sila-produljenje – uzorak 9-3

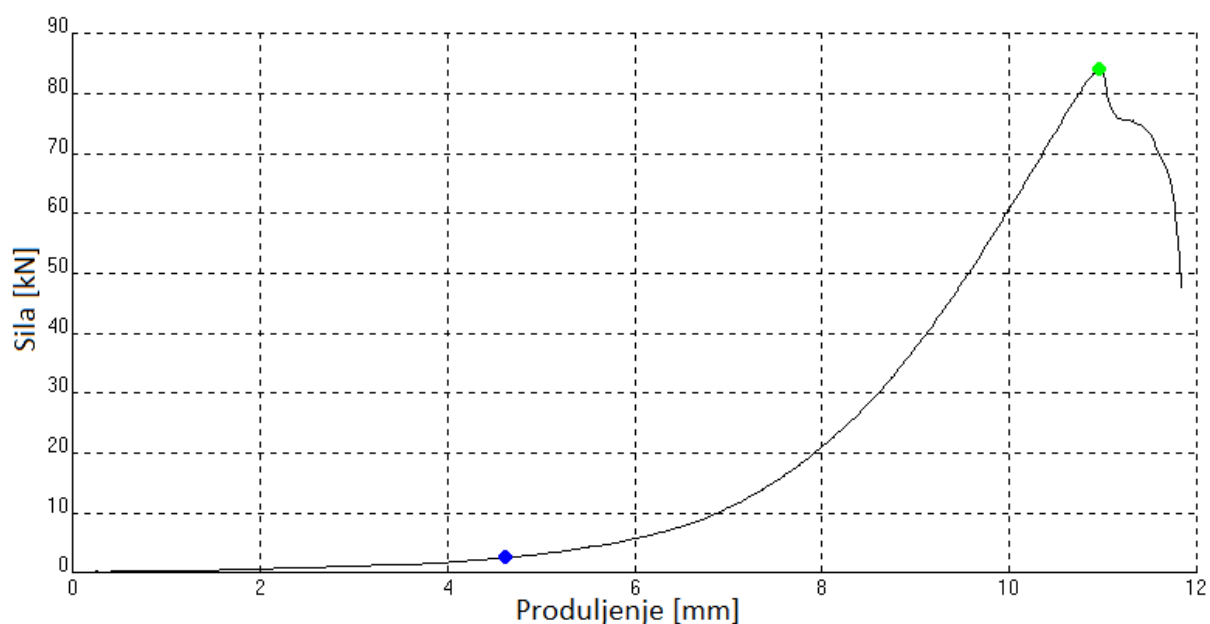
Slika 52. prikazuje epruvetu 9-4 na kojoj se vidi lom epruvete. Lom je propagirao kroz metal zavara i zonu staljivanja, odnosno zavareni spoj. Također i epruveta 9-4 pukla je u zoni staljivanja i dio kroz metal zavara koji je manje vlačne čvrstoće od osnovnog materijala. Vlačna čvrstoća zavarenog spoja iznosi  $418 \text{ N/mm}^2$  što je ispod granice tolerancije i ne zadovoljava zavareni spoj. Ovaj rezultat može biti iz više razloga, a najvjerojatniji je taj što je bila velika površina metala zavara naljepljena na osnovni materijal. Slika 53. prikazuje



dijagram sila-produljenje na kojem se može vidjeti maksimalna sila i sila kidanja. Maksimalna sila  $F_m$  iznosi 83,97 kN.



Slika 52. Epruveta 9-4 – tlocrt pogled



Slika 53. Dijagram sila-produljenje – uzorak 9-4

Kod svih ispitivanih epruveta vidljivo je da je dio puknuća zavarenog spoja bio u zoni staljivanja. Jasno je da je došlo do naljepljivanja metala zavara, što znači da se moraju promijeniti parametri zavarivanja kao bi došlo do penetracije tj. protaljivanja. Kod makro uzoraka kutnih spojeva jasno je vidljiv ZUT i zona staljivanja. Uzorak 2, 3 i 6 zadovoljili su tj. imali su potpuno protaljivanje u osnovni materijal. Uzorci 2 i 3 izvedeni su austenitnim dodatnim materijalom (koji po svojstvima ne zaostaje puno za skupljim), što je dodatna ušteda, a uzorak 3 izveden je najvećom brzinom zavarivanja što dodatno znači veći profit.



## 7. ZAKLJUČAK

Razvoj borbene učinkovitosti oružja potaknuo je i razvoj zaštitnog oklopa, što je dovelo do otkrića novih materijala, među kojima su i oklopni čelici visoke tvrdoće. Danas su ovi čelici nezamjenjivi u vojnoj proizvodnji borbenih oklopih vozila. Također, danas je proizvodnja nezamisliva bez robota, s kojima se postižu značajne uštede u proizvodnji i pojeftinjuje se velikoserijska i masovna proizvodnja.

Daljnja istraživanja na povećanju kvalitete proizvoda i produktivnosti tehnoloških procesa, primarno treba tražiti u segmentu kao što je optimizacija tehnologije i procesa zavarivanja. Kroz eksperimentalni dio ovoga rada izrađeni su pomoću robota uzorci s različitim parametrima zavarivanja, kako bi se kroz provedeno ispitivanje utvrdili optimalni parametri za zavareni spoj, koji će zadovoljiti postavljene uvjete ispitivanja.

U eksperimentalnom dijelu, uzorci za kutni spoj nisu prošli predobradu rubova, a zavareni su se u jednom prolazu. Prilikom zavarivanja uzoraka, mjenjana je brzina i struja zavarivanja, da bi se dobio zavareni spoj potrebne kvalitete, sa što manjim ZUT-om, koji narušuje mehanička svojstva osnovnog materijala. Ispitivanja koja su provedena pokazala su da je potrebno još raditi na tehnologiji i na parametrima zavarivanja, da bi se pronašla optimalna rješenja koja bi zadovoljila uvjete ispitivanja.

Uzorci 2, 3 i 6 zadovoljili su ispitivanja koja su provedena na njima. Kod nerazornih ispitivanja, na ovim uzorcima nije bilo nikakvih velikih indikacija, osim sitnih pora, što znači su uzorci zadovoljili. Kod razornih ispitivanja, niti jedna epruveta ispitana na testu savijanja nije zadovoljila, jer je došlo do njihovog loma već pri malim kutevima savijanja. Prema normi HRN EN ISO 5173:2010, da bi zavareni spoj zadovoljio test savijanja, epruvete bi trebale izdržati savijanje od 180°, bez pojave pukotine ili s pojavom malih pukotina, dužine ne veće od 3 mm. Korijen zavarenog spoja pucao je pod jako malim kutom, koji je prikazan u prethodnim tablicama te pokazao da parametri zavarivanja nisu bili zadovoljavajući. Statičko vlačno ispitivanje pokazalo je da zavareni spoj posjeduje mehanička svojstva koja su u traženim granicama te da treba poraditi na parametrima zavarivanja uz koje ne bi došlo do naljepljivanja metala zavariva.

Zaključno, rezultati ispitivanja su relativno zadovoljavajući. Uzorci koji su zadovoljili zavarivani su austenitnim dodatnim materijalom te s većom brzinom i strujom zavarivanja, čime se postigla ušteda na vremenu i na troškovima zavarivanja. Svakako, preporuka za sljedeća ispitivanja je u tome da se odabere jedan dodatni materijal, s potrebnim tehnološkim i

mehaničkim svojstvima i da se pri zavarivanju izmjenjuje više parametara, s kojima bi se postigla veća optimizacija procesa te postigao zavareni spoj koji u potpunosti zadovoljava tražene uvjete ispitivanja.

## LITERATURA

- [1] Roy C. Liabe: *Ballistic materials and penetration mechanisc*, Elsevier, New York, 1980.
- [2] <http://www.ssab.com/Products/Brands/Armox>, pristupio 10.06.2018.
- [3] Barišić A.: *Određivanje balističkih značajki zavarenog spoja čelika ARMOX 500T*, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [4] M. Novosel, D. Krumes: *Posebni čelici*, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1998.
- [5] D. Showalter, W. Gooch, M. Burkins, J. Montgomery, and R. Squillacioti: *Development and Ballistic Testing of a New Class of Auto-Tempered High-Hard Steels Under Military Specification MIL-DTL-46100E*, Army Reserach Laboratory, Aberdeen Proving ground, 2009.
- [6] T. Filetin, F. Kovačićek, J. Indof: *Svojstva i primjena materijala*, Sveucilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [7] I. Alfirević, B. Modlic: *Inženjerski priručnik*, Školska knjiga, Zagreb, 1998.
- [8] M. Franz, D. Ćorić: *Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstava materijala*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2008.
- [9] Garašić I.: Autorizirana predavanja iz kolegija „Zavarljivost materijala“, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [10] R. Rauch, S. Kapl, G. Posch, K. Radlmayr, *High Strenght Low Alloy Steel Weldments with Accommodated Qualities to the Base Metal*, Springer, 2012.
- [11] Kolednjak, D.: *Utjecaj parametara zavarivanja na strukturu i svojstva čelika API 5L X80*, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2014.
- [12] Lukačević Z.: *Zavarivanje*, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1998.
- [13] Juraga I., Ljubić K., Živčić M.: *Pogreške u zavarenim spojevima*, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Zagreb, 2007.
- [14] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Gre%C5%A1ke\\_u\\_zavarenim\\_spojevima](https://hr.wikipedia.org/wiki/Gre%C5%A1ke_u_zavarenim_spojevima), 15.06.2018.
- [15] Samardžić I.: *Analiza tehnološkičnosti zavarenih konstrukcija* – digitalni udžbenik, Sveučilište u Osijeku, Strojarski fakultet, Slavonski Brod
- [16] Tomić T.: *Utjecaj sadržaja vodika na zavarljivost čelika API 5L X80*, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [17] Kralj S., Dunder M.: *Ispitivanje sklonosti zavarenih spojeva čelika 25CrMo4 i Ck45*

- prema nastajanju hladnih pukotina*, Zavarivanje, Zagreb, 2000.
- [18] Gojić M.: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak, 2003.
- [19] Kralj S.; Kožuh Z.; Andrić Š.: Priručnik zavarivački i srodni postupci, Zagreb, 2015.
- [20] Kalpakjian; Schmid: Manufacturing Processes for Engineering Materials 5th ed, Pearson Education 2008.
- [21] Karaga I.: *Značajke TIG zavarivanja impulsnim strujama*, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [22] Vručinić G.: *Zavarivanje i zavarljivost aluminija i legura*, Zavod za zavarivanje, Ispitivanje i tehnologiju d.o.o., Zagreb, 2008.
- [23] Welding Handbook, Seventh Edition, Volume 4, Metals and Their Weldability, American Welding Society, Miami, 1997.
- [24] Đuro Đaković – Specijalna vozila, Slavonski Brod, zavarivačka radiona, 18.05.2018.
- [25] [www.fronius.com](http://www.fronius.com); 18.06.2018.
- [26] Tucman T.: *CMT proces - nova revolucija u digitalnom zavarivanju*, Fronius technologie center, Pula, 2008.
- [27] Pek N.: *Optimizacija robotiziranog postupka zavarivanja tankih ploča od aluminija EN AW 5754*, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.